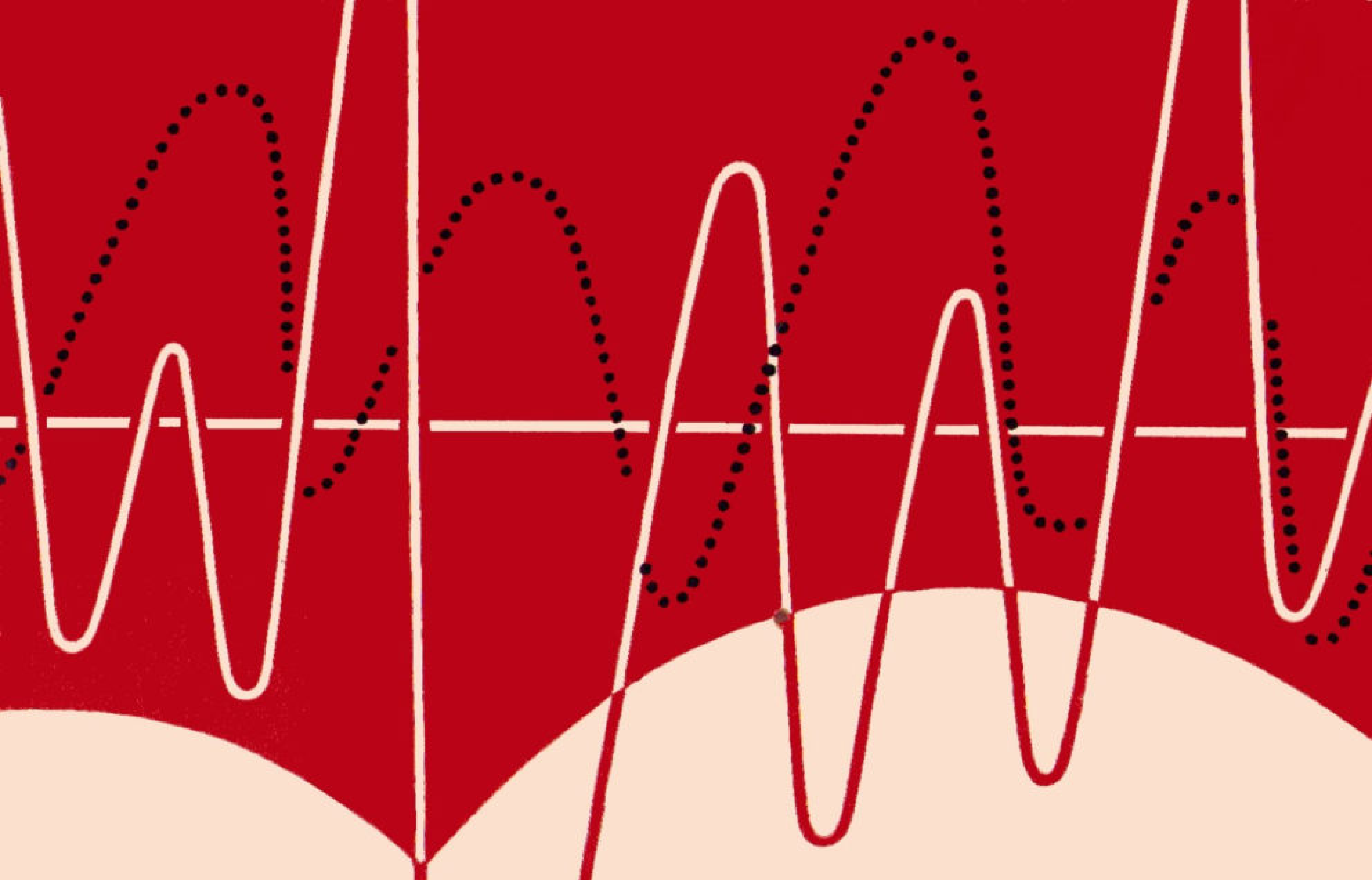


G. SLOT

GELUIDSKWALITEIT

Waaraan een geluidsinstallatie moet voldoen; over klanken van muziekinstrumenten en eigenschappen van het oor

kader REEKS

Gescand en gerestaureerd door Jos Verstraten - 2025

GELUIDSKWALITEIT

N.V. UITGEVERSMAATSCHAPPIJ CENTREX — EINDHOVEN

GELUIDSKWALITEIT

Waaraan een geluidsinstallatie moet voldoen
Over klanken van muziekinstrumenten
en eigenschappen van het oor

G. SLOT

kader REEKS

Mededeling van de uitgever:
Vertaald uit het Engels door D. C. van Reijendam, Zwolle
Het bevat 170 pagina's, 61 figuren en 26 tabellen
U.D.C. nr. 534

Oorspronkelijke uitgave:
© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1963
Nederlandse uitgave:
© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1963
Nadruk, ook gedeeltelijk, verboden

Geen garantie wordt gegeven dat de in dit boek vervatte informatie vrij loopt van octrooirechten; door deze publicatie wordt geen enkele licentie onder eventueel bestaande octrooien verleend

Gedrukt in Nederland

VOORWOORD

Bij het nemen van proeven waarbij de weergave van muziek met het oorspronkelijke geluid werd vergeleken, rees bij mij de gedachte dat het mogelijk moest zijn om tot een objectieve definitie van de begrippen Weergavekwaliteit en High Fidelity te komen. Uitnodigingen om over dit onderwerp te spreken in Noorwegen en Frankrijk, dwongen mij mijn oorspronkelijk vage ideeën te preciseren. In dit boek zijn deze gedachten verder uitgewerkt en zo uitvoerig mogelijk uiteengezet. Ik ben mij ervan bewust dat het nog tal van punten bevat die bestreden kunnen worden. Gezien de nog steeds heersende verwarring acht ik mijn doelstelling al bereikt als in de discussie althans een vaste lijn wordt gebracht.

Een overweging die mij speciaal tot het schrijven van dit werk bracht is dat vele geluidsamateurs en muziekliefhebbers nodeloos onzeker zijn over de eigenschappen van de soms voortreffelijke installaties die zij bezitten of dat zij niet kunnen beslissen bij de aanschaffing van nieuwe apparatuur daar zij niet weten welke eisen te moeten stellen. Dit laatste is een probleem waar ook de ontwerper van nieuwe apparatuur mee te maken heeft. Om een ruime kring van geïnteresseerden te kunnen dienen is de behandeling van het onderwerp zo eenvoudig mogelijk gehouden doch is tevens een bibliografie opgenomen van boeken en tijdschriftartikelen die vrijwel overal te raadplegen zijn.

Het is mij een behoefte de velen in binnen- en buitenland te danken die mij met hun waardevolle adviezen hebben terzijde gestaan. Verder dank ik Ing. van Reijendam voor zijn vertaling van het oorspronkelijk in het Engels geschreven manuscript.

G. Slot

april 1963

INHOUD

HOOFDSTUK I. Het probleem ... 1

1—1. Waarom piekeren? ... 1
1—2. De betrekkelijkheid van getrouwheid ... 2

HOOFDSTUK II. De technische specificatie ... 9

2—1. De correlatiecoëfficiënt ... 9
2—2. Waar op moet worden gelet ... 13

HOOFDSTUK III. Vereiste vermogen ... 17

3—1. Het gewone geluidssterkteniveau ... 17
3—2. Waarom geluidssterkte als in een concertzaal? ... 18
3—3. Hoeveel watt? ... 22
3—4. Hoe staat het met de buren? ... 31

HOOFDSTUK IV. Niet-lineaire vervorming ... 34

4—1. Subjectieve vervorming ... 34
4—2. Maskeren van vervorming ... 38
4—3. Toelaatbare vervorming van muzikale klanken ... 43
4—4. Proefondervindelijk bewijs ... 46

HOOFDSTUK V. Weergavekarakteristiek ... 50

5—1. Over gewoonten ... 50
5—2. De onderste grens van het frequentiegebied ... 51
5—3. De bovengrens van het frequentiegebied ... 54
5—4. Toe te laten afwijkingen ... 58
5—5. Fazefouten ... 61
5—6. Frequentie en vermogen ... 62

HOOFDSTUK VI. Afwijkingen van de toonhoogten ... 66

6—1. De juiste toonhoogte ... 66
6—2. Toonhoogtevariaties ... 72

HOOFDSTUK VII. Achtergrond bijgeluiden ... 83

7—1. Bijgeluiden in de kamer ... 83
7—2. Bijgeluiden van de installatie en maskering ... 85
7—3. Brom en dreun ... 87
7—4. Achtergrondgeruis ... 91

HOOFDSTUK VIII. Stereofonie 95

8–1. Algemene eisen 95
8–2. Overspreken 103
8–3. Over de juiste zitplaats bij stereo („stereostoel") 114
8–4. Als er bezwaren zijn 118

HOOFDSTUK IX. Ambiofonie 121

HOOFDSTUK X. Proefondervindelijk bewijs 129

10–1. Spreker of luidspreker? 129
10–2. De getrouwheid van monofonische weergave 131
10–3. High Fidelity stereofonie 137

HOOFDSTUK XI. Classificatie 142

11–1. Wat is Hi-Fi? 142
11–2. Classificatie van Hi-Fi 143

HOOFDSTUK XII. Naschrift-De Installatie 153

12–1. Van microfoon tot oor 153
12–2. De onderdelen 157

AANHANGSEL 165

Harmonische en niet-harmonische vervorming 165

HOOFDSTUK I

HET PROBLEEM

1-1. Waarom piekeren?

Of nu een installatie moet worden ontworpen voor het opnemen of het weergeven van geluid, of dat men aan de aanschaffing daarvan toe is, steeds komt de vraag naar voren aan welke eisen zij zal moeten voldoen

Zelfs de punten, die in het eisenblad moeten worden opgenomen geven dikwijls aanleiding tot eindeloze besprekingen. Dat ligt voor de hand wanneer we bedenken, dat de technische eisen, die worden gesteld, een beslissende invloed uitoefenen op de prijs van de installatie. Over het algemeen zijn financiële overwegingen voor de fabrikant en de koper net zo belangrijk als de vraagstukken van technische aard. Als de koper geen specialist is in elektro-akoestische zaken, dan kan zijn keuze van de installatie zelfs worden bepaald door overwegingen van niet-technische aard, zoals de prijs, de afmetingen en het uiterlijk.

We kunnen dan ook onderscheid maken tussen twee verschillende groepen mensen, die kunnen piekeren over de eigenschappen van een elektro-akoestische installatie. De eerste is de technische groep, welke de fabrikanten en die kopers omvat, die weten dat iedere verbetering van de technische eigenschappen boven een zeker gemiddelde vergezeld kan gaan van een prijsverhoging, die in geen enkele verhouding staat tot de verbetering. Zij zullen alleen besluiten over te gaan tot het invoeren van een dergelijke verbetering (b.v. groter uitgangsvermogen of breder frequentiegebied) als ze er van overtuigd zijn dat het de moeite waard is. Jammer genoeg is de werkelijke waarde van een of andere verandering in de technische eigenschappen moeilijk te schatten en dat is dan ook de reden waarom technici, als zij een lijst met eisen opstellen, zich zo dikwijls zullen afvragen of zij wel de juiste beslissingen hebben genomen. Zelfs de uitgebreidste luisterproeven geven nog maar weinig zekerheid. Pas na langer gebruik van een installatie maakt een zeker gevoel van tevredenheid (of ontevredenheid) zich van ons meester.

De tweede groep, de niet-technische dus, zal voor het grootste gedeelte worden gevormd door de kopers. Gewoonlijk zijn ze heel gelukkig met hun installatie zolang die nog splinternieuw is. Maar kort na de opstelling en

vooral wanneer ze andere installaties hebben gehoord, die hetzelfde of meer kosten en anders klinken dan hun eigen installatie, beginnen ze er over te piekeren of ze nu wel een verstandige aankoop hebben gedaan of niet. Dit slaat vooral op díe mensen, die een installatie hebben gekocht, die beschouwd kan worden als „beter dan de gemiddelde". De gelukkigste mensen zijn zij, die een of andere grammofoon of bandopnemer hebben, die beslist niet beter is dan de gemiddelde. Zij piekeren er niet over, want het idee dat beter geluid mogelijk of wenselijk is komt zelfs niet bij hen op. Wij zulen ons niet met deze gelukkige mensen bezig houden, maar zullen in de volgende paragraaf trachten te analyseren waarom het werkelijk zo moeilijk is de kwaliteit van een elektro-akoestische installatie juist te waarderen.

Onder kwaliteit verstaan we hier niet de numerieke waarden van de verschillende prestatiecijfers, maar meer hun invloed op de graad van voldoening, die men kan bereiken wanneer naar gereproduceerd geluid wordt geluisterd.

De artistieke waarden van het betreffende geluid zullen we buiten beschouwing laten, hoewel ook die natuurlijk de voldoening beïnvloeden. Wij mogen niet verwachten dat een kerkorganist erg gelukkig zal zijn met een prima weergave van een Dixieland opname. Het doel waar we naar streven is, dat de weergave van een geluid dezelfde graad van genot zal geven als het originele geluid. Dat zal niet altijd worden bereikt, maar we hopen te bewijzen, dat een grotere graad van natuurgetrouwheid kan worden bereikt dan meestal het geval is. We zullen ook zien, dat, wanneer het om een minder perfecte installatie gaat, het tot op zekere hoogte toch mogelijk is de tekortkomingen te waarderen in verhouding tot het geluid, dat we willen reproduceren. Een dergelijke zekerheid betreffende de tekortkomingen is te verkiezen boven de onzekerheid over de graad van perfectie. We behoeven ons dan geen zorgen meer te maken en het kan zelfs van nut zijn als we verbeteringen overwegen.

1-2. De betrekkelijkheid van getrouwheid

Installaties, mits niet de goedkoopste, krijgen meestal een of ander etiket opgeplakt. Dat kan luiden: professioneel, transcriptie, studio of High Fidelity. Deze laatste uitdrukking, die tegenwoordig niet meer zoveel wordt misbruikt als enkele jaren geleden, wordt meestal gebruikt voor niet-professionele installaties. De beste niet-professionele installatie echter

zal, voor zover het de elektro-akoestische eigenschappen betreft, maar heel weinig van studio-installaties verschillen, hoewel deze laatsten met andere normen voor betrouwbaarheid, robuustheid, bedieningsmogelijkheden enz. worden geconstrueerd. Binnen het bestek van dit boek zijn deze verschillen niet van belang en daarom zal de uitdrukking High Fidelity worden gebruikt als dat toepasselijk is, zonder enig onderscheid te maken tussen installaties of onderdelen, die in een studio of in een huiskamer worden gebruikt.

Over de uitdrukking „High Fidelity" is tot nu toe nog nooit een principiële afspraak gemaakt. Verschillende organisaties hebben de eisen gespecificeerd waaraan een installatie zou moeten voldoen alvorens deze het etiket High Fidelity toe te mogen kennen, maar dergelijke specificaties, hoe nuttig overigens ook, verschillen van organisatie tot organisatie enkel en alleen om de eenvoudige reden, dat geen enkele daarvan gebaseerd is op een algemene definitie van High Fidelity. Tot op zekere hoogte laat deze uitdrukking geen definitie toe. „Perfect" is volgens het woordenboek: „Volledig, niet onvolmaakt, zonder fouten". „High quality" is minder dan volmaakt, maar tot welk niveau van onvolmaaktheid moeten we afdalen om het bijvoeglijk naamwoord „high" te kunnen zetten voor het zelfstandige naamwoord „quality" of het zelfstandige naamwoord „fidelity"? Om dit probleem te kunnen oplossen moeten we eerst definiëren wat volmaakte of absolute getrouwheid (fidelity) is.

Het voornaamste doel van geluidsweergave is het reproduceren van muziek voor het plezier, dat het luisteren daarnaar geeft. Nu is het niet helemaal zeker dat een installatie, die ontworpen is volkomen in overeenstemming met eisen, die gebaseerd zijn op wetenschappelijk onderzoek, ook de meest voldoening gevende reproductie van muziek zal geven.

Ook kan niet met zekerheid worden volgehouden dat een reproduktie, die de meest kritische toehoorder tevreden stelt, zal voldoen aan de met de grootste nauwkeurigheid vastgestelde objectieve technische specificatie.

Het is zeer goed mogelijk dat er een zeker verband van relativiteit bestaat — geluidsweergave kan worden gerealiseerd in overeenstemming met (objectieve) technische normen en zelfs als zij technisch volmaakt is kan er toch nog onzekerheid bestaan over de grootte van de muzikale bevrediging. Dus kan ook, als subjectief de weergavekwaliteit als volmaakt wordt beoordeeld, er enige twijfel bestaan betreffende de technische eisen. Deze theorie van de betrekkelijkheid van getrouwheid kan door een aantal argumenten worden ondersteund. Een daarvan is dat de klanken,

die door de meeste muziekinstrumenten worden voortgebracht niet alleen worden bepaald, maar ook worden begrensd door de constructie daarvan. Dit geldt voor alle mechanische instrumenten en in mindere mate ook voor elektronische instrumenten. Hoewel wij aan deze klanken gewend zijn is het niet onmogelijk dat, als zij op een of andere wijze konden worden veranderd, zij nog mooier zouden worden gevonden en dus meer voldoening schenkend.

De schrijver van dit boek constateerde toen hij zekere proeven nam, die in hoofdstuk X uitvoeriger worden beschreven, dat de klank van een contrabas, als de grondtoon en lagere harmonischen langs elektro-akoestische weg extra werden versterkt, door een grote groep toehoorders „natuurlijker" werd bevonden dan de klank van het instrument zelf. Vermeulen, die dezelfde ervaringen opdeed, constateerde ook nog dat als een klank, voortgebracht door een viool, elektro-akoestisch werd versterkt, de klank beter werd bevonden dan van de originele viool [1]. Tijdens zijn experimenten werd een aantal losse violen (slaafviolen) in trilling gebracht door middel van een elektrodynamisch systeem, dat via een versterker was gekoppeld met een opnemer, die was aangebracht in de viool, die door een solist werd bespeeld. Het inschakelen van de versterker gaf niet de indruk, dat er meer violen speelden, doch enkel van een betere viool.

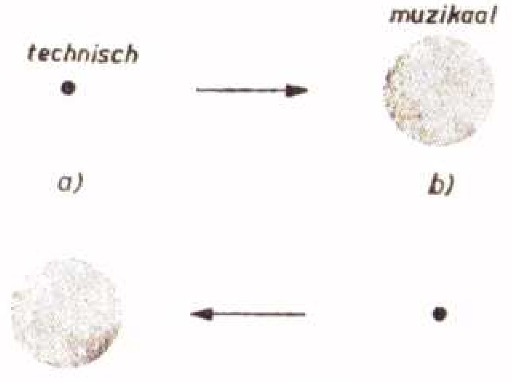


Fig. 1. Technisch volmaakte weergave leidt tot onzekerheid betreffende de muzikale kwaliteiten.
Muzikaal volmaakte weergave leidt tot onzekerheid betreffende de technische omschrijving.

Zo blijkt het dus mogelijk te zijn dat, als de weergavekarakteristiek van een geluidsopname en -weergave keten niet volkomen vlak is, of als enkele van de muziekinstrumenten worden weergegeven met een sterkte, die niet

gelijk is aan de werkelijkheid, het resultaat subjectief beoordeeld meer voldoening geeft, dan wanneer de weergave volkomen in overeenstemming is met de technische normen.

Zelfs al willen we het gebruik van elektrische correcties voor het verkrijgen van effecten, die op een andere wijze met mechanische instrumenten niet zijn te bereiken, niet verdedigen, realiseren we ons toch wel dat tot op zekere hoogte onbewust correctie kan worden aangebracht met behulp van toon- of volumeregelaars of door de plaatsing van de microfoons.

De klank van de muziek is daarenboven niet alleen een kwestie van het instrument en de persoon, die het bespeelt, de akoestiek van de gehoorzaal oefent ook een grote invloed daarop uit. Het is interessant te weten, dat toen ambiofonie (kunstmatige nagalm) voor het eerst werd geprobeerd in een concertzaal in Den Haag de algemene indruk van het overgrote deel van de bezoekers niet was, dat de akoestiek was verbeterd, maar dat het orkest beter speelde dan vroeger.

In feite vereist iedere soort muziek bepaalde akoestische omstandigheden. In de meeste concertzalen kunnen de akoestische eigenschappen niet van geval tot geval worden aangepast. Wanneer we een apparaat voor kunstmatige nagalm beschouwen als een onderdeel van een elektroakoestische installatie, dan hebben we nog een reden waarom reproduktie verschillend kan zijn van het origineel en meer voldoening kan geven.

Omdat woorden dikwijls te kort schieten wanneer er over muziek wordt gesproken of geschreven, worden dikwijls vergelijkingen gemaakt tussen de takken van kunst, die het oog en die het oor strelen. Deze vergelijking kan worden uitgebreid om een typisch probleem bij de reproduktie van muziek te illustreren.

Bij een schilderij hangt, als het eenmaal klaar is, de waardering ervoor alleen af van het schilderij en degene, die er naar kijkt. Noch de kunstenaar, noch iemand anders heeft er enige invloed op hoe iemand een schilderij ziet. De enige factor, die de waardering kan beïnvloeden, is de verlichting. Wanneer een technisch volmaakte reproduktie zou kunnen worden gemaakt om het schilderij te vervangen, zou de beschouwer niet in staat zijn enig verschil te constateren. Een muzikale compositie moet worden herschapen door uitvoerende musici. Een opname van een stuk muziek is niet de opname van een compositie. Het is de opname van een uitvoering van die compositie door menselijke wezens. Daarom moeten, terwijl er in het geval van een schilderij niemand is tussen de schepping en de beschouwer,

als het een muziekwerk betreft, een of meer menselijke wezens noodzakelijk worden ingeschakeld tussen de schepping en de luisteraar.

Wanneer er een reproduktie wordt gemaakt van een schilderij of een beeldhouwwerk, kunnen alleen technische tekortkomingen verraden dat het een copie is. Betreft het echter muziek, dan toont de afwezigheid van uitvoerenden duidelijk het feit, dat de muziek de luisteraar bereikt via een kunstmatige schakel.

Tabel 1

	Schilderen		Muziek	
schepper	schilder		componist	
gereedschappen	penselen linnen palet		pen of potlood papier	
materialen	kleuren		toonladders	
produkt	schilderij -	reproduktie	compositie	
waarneming	direct	direct	uitvoerend musicus	- reproduktie
waarnemer	beschouwer	beschouwer	luisteraar (en kijker)	luisteraar

Het materiaal waarmee de scheppende kunstenaar werkt wordt, in het geval van de schilder, aangebracht voor zijn werk gereed is — de componist moet het belangrijke materiaal waarmee hij werkt overlaten aan de zorgen van anderen — de klank wordt pas aan de compositie toegevoegd nadat deze geheel gereed is.

De verschillen tussen muziek en schilderen in hun respectievelijke relaties tot het publiek kunnen misschien nog worden geïllustreerd door enkele moderne vertegenwoordigers van beide kunsten, waarbij deze verschillen de neiging hebben te verdwijnen.

Bij zeefdruk (silkscreening) verschijnt het uiteindelijke produkt, de afbeelding, na een reproduktieproces. Hier is de kunstenaar in principe, zo niet in feite, de persoon die zijn eigen werk herschept.

Bij elektronische muziek schept de componist eveneens dikwijls zijn werk op een medium dat zodanig is, dat de compositie in geluid kan worden omgezet zonder de directe tussenkomst van menselijke uitvoerenden. In dit geval is de schakel tussen componist en luisteraar de magnetische geluidsband, die een soortgelijke rol speelt voor de muziek als het linnen of papier voor een schilderij. Het luisteren naar elektrische muziek via de radio of via een grammofoon is, wanneer er geen technische onvol-

komenheden zijn, in alle opzichten identiek aan het luisteren naar de originele bandopname.

Weinig of niets is er bekend over de invloed die de afwezigheid van uitvoerende musici heeft op de waardering van vocale en instrumentale muziek. We kunnen veilig aannemen, dat deze invloed niet te verwaarlozen is. Door Moles [2] en anderen is aangevoerd, dat veel luisteraars, met inbegrip van personen met een goede ontwikkeling, de krant of een boek lezen terwijl zij naar waardevolle radiomuziek luisteren.

Dit zou niet mogelijk zijn in de concertzaal, waar het geluidsniveau hoger is dan het normale geluidsniveau bij radioweergave. Het schijnt dat de luisteraar in de huiskamer het opnemend vermogen van zijn hersenen tot het uiterste wil belasten. In de concertzaal, waar het geluidsniveau hoger ligt, zal het niet mogelijk zijn het opnemend vermogen van de hersenen nog zwaarder te belasten door indrukken, die via het oog worden opgenomen en geen verband houden met de indrukken, die het oor opneemt. Wij kunnen echter, en we doen dat ook, onze ogen gebruiken om visuele indrukken op te vangen die gelijk lopen met de muziek, door naar het orkest, de solisten en de dirigent te kijken.

Toen we enkele solisten en orkestmusici vroegen hoeveel concertbezoekers naar de muziek luisteren met hun ogen op het orkest gericht, was de laagste schatting 75 %. Menige grammofoonplatenliefhebber zal ontdekt hebben dat hij heel dikwijls, als hij naar een plaat luistert, zal zitten te kijken naar de fraaie hoes, waarin de fabrikant de platen verpakt om de verkoop te bevorderen.

Dit alles wijst op het belang van het zien zowel als het horen voor een volledige esthetische waardering van de muziek. Hierbij komt nog het psychologische feit, dat bij de reproduktie van muziek de afwezigheid van de musici ons verraadt dat we voor de gek worden gehouden en naar „ingeblikte" muziek luisteren. De auteur was eens aanwezig bij een demonstratie waarbij achter een dun gordijn zowel luidsprekers als een strijkoctet waren opgesteld. Ons werd gevraagd te raden wat er speelde. Nadat we geraden hadden dat we het octet hoorden werd het gordijn opgehaald en we zagen de musici niets doen. Maar op hetzelfde ogenblik hoorden we verschillende onvolkomenheden in het geluid. Hierop volgende proeven toonden aan dat de doorlaatbaarheid voor geluid van het vitragegordijn ongeveer 100% was en dus was het verschil dat we dachten te horen zuiver en alleen van psychologische aard.

Dus als we weten, dat we naar gereproduceerde muziek luisteren, dan

zijn we al in het nadeel. We zullen wantrouwend zijn en zelfs als de weergave technisch volmaakt is en akoestisch volkomen gelijk aan het origineel, dan blijft nog steeds het gevaar bestaan, dat we toch niet helemaal voldaan zijn. Het is echter mogelijk, dat door een speciale opstelling van de opneemmicrofoons, zekere veranderingen in de frequentiekarakteristiek en andere technische kunstgrepen het ontbreken van de musici minder opvallend kan worden gemaakt. Er zijn geen gegevens beschikbaar over de aard en de grootte van dergelijke correcties. Technici hebben ze intuïtief met meer of minder succes toegepast en zij kunnen zeer zeker ons esthetische genot vergroten. Maar we kunnen ze niet meten. De onzekerheid betreffende de muzikale of subjectieve eisen en de technische of objectieve eisen moet, tenminste nog op dit moment en door deze schrijver, worden aanvaard. In dit boek zullen wij ons verder geheel beperken tot de technische voorschriften en het aan de eigenaar van een high fidelity installatie overlaten zo goed mogelijk gebruik te maken van de verschillende correctiemogelijkheden, die zijn installatie bezit. De basis van ieder technisch eisenblad moeten de bekende wetenschappelijke feiten zijn. Op deze basis kunnen subjectieve correcties worden toegepast, die er voor kunnen zorgen, dat de uitvoering voldoet aan de eisen, die uit muzikaal standpunt worden gesteld.

Om onze analyse van de technische eisen te vervolgen, zullen we eerst de „perfecte weergave" nader omschrijven. Dit behoeft niet beslist een weergave te zijn die volkomen gelijk is aan het origineel. Wanneer de verschillen tussen het oorspronkelijke geluid en het gereproduceerde geluid zo klein zijn dat we ze niet kunnen waarnemen, dan kunnen we voor alle praktisch voorkomende gevallen de weergave perfect noemen.

Daarom is perfecte weergave een weergave op een zodanige wijze, dat de technische onvolkomenheden buiten ons waarnemingsvermogen liggen. Het zal duidelijk zijn dat als verschillende installaties voldoen aan alle eisen, die van belang zijn voor een perfecte weergave, het onmogelijk is door luisterproeven onderscheid tussen deze installaties te maken, zelfs niet als de technische gegevens verschillen. Is de weergavekwaliteit minder dan perfect, dan kunnen we haar High Fidelity noemen, vooropgesteld dat de weergave niet onder een zekere lagere grens ligt. In de volgende hoofdstukken zullen we eerst de eisen voor perfecte weergave of absolute getrouwheid onderzoeken. Daarna zullen we, door deze algemene eisen te vergelijken met de specifieke eisen, die de weergave van verschillende muziekinstrumenten stellen, trachten de uitdrukking „High Fidelity" te definiëren en te classificeren.

HOOFDSTUK II

DE TECHNISCHE SPECIFICATIE

2-1. De correlatiecoëfficiënt

Het leven van de ontwerper en de koper van een geluidsinstallatie zou heel wat gemakkelijker zijn wanneer het door een enkele proef mogelijk zou zijn voor een installatie een waarderingscijfer vast te stellen, dat op een ondubbelzinnige wijze de kwaliteit van de installatie aangeeft.

Een dergelijke proef zou bijvoorbeeld kunnen bestaan uit het plaatsen van een microfoon in de opneemstudio en de uitgangsspanning daarvan aan te sluiten op een oscilloscoop. Het oscillogram zou kunnen worden gefotografeerd en de foto kon dan later worden vergeleken met een tweede, die in de afspeelruimte werd gemaakt met de microfoon ergens voor de luidsprekers opgesteld. Deze methode introduceert al dadelijk een afwijking, want een enkele microfoon ontvangt de geluidsgolven zonder rekening te houden met de richting waaruit zij komen. Zelfs als we dat verwaarlozen of als we werken met verschillende microfoons, die zodanig worden opgesteld en aangesloten, dat de combinatie dezelfde richtingskarakteristiek heeft als het menselijke oor, dan zou de methode toch nog niet geschikt zijn om tot een waarderingscijfer te komen.

Als we de twee oscillogrammen vergelijken, zullen er verschillen worden opgemerkt. Deze verschillen worden veroorzaakt door verschijnselen als: vervorming, verschil in weergavekarakteristiek, faze-verschuiving en „janken" om er eens een paar te noemen. Deze verschijnselen zullen het tweede oscillogram in zekere mate vervormen, maar niet altijd in dezelfde richting. Zo kan het bijvoorbeeld voorkomen, dat als tengevolge van vervorming de top van een speciale golfvorm wordt afgeplat, een onregelmatigheid in de weergavekarakteristiek dit verschijnsel juist tegenwerkt, zodat twee onvolkomenheden, die tegelijkertijd optreden, elkaar in het oscillogram kunnen compenseren. Ons gehoor echter kan daarover anders oordelen.

Een verbetering van deze methode, waarbij de signalen direct worden vergeleken en die niet zoveel te lijden heeft van bovengenoemde tekortkoming wordt soms toegepast voor het beproeven van losse elektro-

akoestische onderdelen, zoals b.v. microfoons. Hoewel we niet weten of deze methode ooit is toegepast voor volledige opneem- of weergeef-installaties en we zelfs betwijfelen of dat ooit met succes zou kunnen gebeuren, noemen we haar hier omdat zij een duidelijke illustratie is van de buitengewoon hoge graad van nauwkeurigheid, die nodig is voor „high fidelity"-weergave. Zij levert inderdaad een enkel waarderingscijfer op: de correlatiecoëfficiënt, die aangeeft in welke mate twee signalen aan elkaar gelijk zijn.

Voor het meten van de correlatiecoëfficiënt van twee microfoons, waarvan de ene een standaardmicrofoon is, gebruikte Krieger [3] een opstelling, die vereenvoudigd is getekend in fig. 2. De luidspreker L

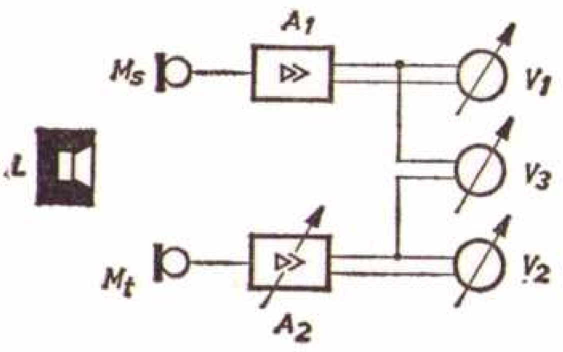


Fig. 2. Vereenvoudigd schema van een inrichting voor het meten van de correlatiecoëfficiënt van microfoons.

straalt een geluidssignaal uit, M_s is de standaardmicrofoon, M_t is de te controleren microfoon, A_1 en A_2 zijn twee „hoogwaardige" versterkers, de laatste voorzien van geluidssterkteregelaar. V_1, V_2 en V_3 zijn voltmeters, die nauwkeurig de effectieve waarden aangeven. De versterking van versterker A_2 wordt zodanig ingesteld, dat de aanwijzing van voltmeter V_3 zo laag mogelijk is. De correlatiecoëfficiënt Q_{12} kan dan worden berekend uit:

$$\frac{V_3}{V_1} = \sqrt{1 - Q_{12}{}^2}$$

zodat in het geval van prima correlatie, als $V_1 = V_2$ en dus $V_3 = 0$ zal zijn, de correlatiecoëfficiënt $Q_{12} = 1$. In alle andere gevallen zal hij minder dan 1 zijn.

Toen een condensatormicrofoon van dezelfde constructie als de standaardmicrofoon daarmee werd vergeleken was de correlatiecoëfficiënt 0,999.

Een tweede condensatormicrofoon met een groter diafragma leverde een correlatiecoëfficiënt op van 0,98. We kunnen aannemen dat vervorming, brom en ruis van deze drie microfoons praktisch gelijk waren

en te verwaarlozen gering, zodat de verschillende resultaten alleen maar konden worden veroorzaakt door verschillen in de weergave-karakteristieken. Deze zijn in fig. 3 getekend voor het bij deze proeven

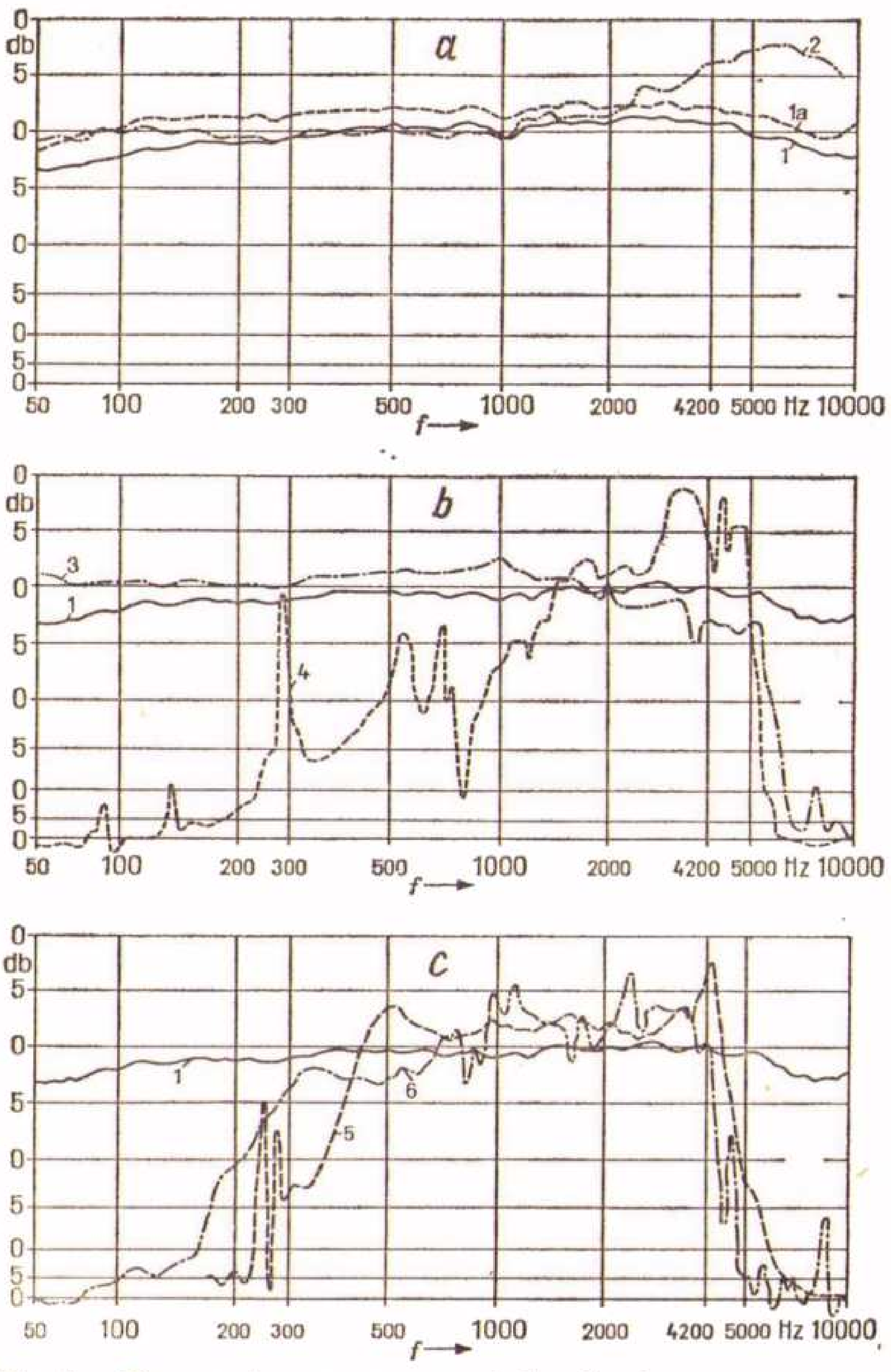


Fig. 3. Weergavekrommen van enkele microfoons, waarvan de correlatiecoëfficiënten zijn opgenomen in tabel 2.

gebruikte frequentiegebied (300 — 4200 Hz). Zoals in hoofdstuk V zal blijken, zullen de verschillen tussen de krommen 1 en 1a zelfs niet door de

meest kritische luisteraar kunnen worden opgemerkt, maar de verschillen tussen 1 en 2 kan men horen. Dat wil zeggen, dat voor perfecte weergavekwaliteit de correlatiecoëfficiënt in ieder geval beter moet zijn dan 0,98.

Tabel 2

	Type microfoon	correlatie-coëfficiënt
1	standaard microfoon	(1)
1a	condensatormicrofoon 10 mm ϕ (zelfde type als standaardmicrofoon)	0,999
2	condensatormicrofoon 30 mm ϕ	0,98
3	kristalmicrofoon	0,955
4	elektrodynamische microfoon (lintmicrofoon)	0,80
5	elektrodynamische microfoon (lintmicrofoon)	0,77
6	koolmicrofoon	0,69

Een kristalmicrofoon [3] met een iets minder rechte weergavekarakteristiek, leverde een correlatiecoëfficiënt op van 0,955. Alleen een koolmicrofoon [6] met een correlatiecoëfficiënt van 0,69 leverde een verminderde verstaanbaarheid van spraak op. Hieruit volgt, dat verstaanbaarheid een aanmerkelijk minder streng criterium is dan de correlatiecoëfficiënt.

Nu betekent een afwijking van 1 dB in de weergavekarakteristiek, dat de amplitudefout 12% is. Als wij gaan letten op harmonische en intermodulatie vervorming dan kunnen alleen afwijkingen, die nog kleiner zijn, worden toegelaten. Dat betekent, dat in werkelijkheid een high-fidelity-installatie, als het uitgangssignaal daarvan wordt vergeleken met het originele geluid, een correlatiecoëfficiënt zou moeten bezitten, die zelfs dichter bij 1 ligt dan 0,98.

Zoals reeds werd opgemerkt zullen niet alle onvolkomenheden van het geluidssignaal dezelfde invloed hebben op de waardering op het gehoor en daaruit volgt dat, zelfs als het mogelijk zou zijn de correlatiecoëfficiënt van een volledige elektro-akoestische installatie te meten ten opzichte van het oorspronkelijke geluid, de resultaten toch geen zuiver waarderingscijfer zouden opleveren. Het voorbeeld toont echter aan, dat een zo hoge graad van precisie vereist is, dat het beter zal zijn de verschillende mogelijke onvolkomenheden in het signaal stuk voor stuk te meten.

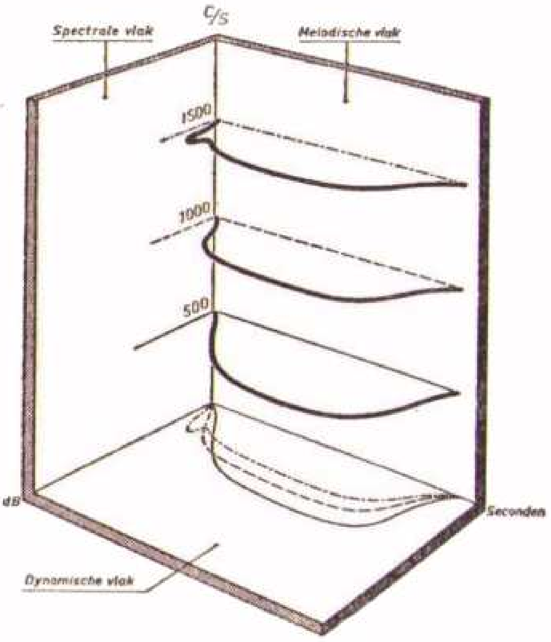
2-2. Waar op moet worden gelet

Om de waarde te bepalen van een elektro-akoestische installatie, zal het nodig zijn een voor een de verschillende karakteristieken van het uitgangssignaal op te meten, omdat een directe bepaling van een waarderingscijfer niet mogelijk is. Dit uitgangssignaal is over het algemeen buitengewoon ingewikkeld. Zuivere sinusvormige golven zouden maar weinig moeite veroorzaken, maar ze worden uit muzikaal oogpunt als weinig aantrekkelijk beschouwd en komen ook zelden in de muziek voor. Sommige fluit- en orgeltonen zijn bijna sinusvormige golven, bij de elektronische muziek worden ze soms gebruikt, maar als regel geldt, dat ieder muzikaal geluid uit een groot aantal componenten bestaat. De Fourier analyse maakt het mogelijk ieder samengesteld signaal in zijn componenten te ontleden. Dit is een moeilijk werk als het gaat om muzikale geluiden en we krijgen daardoor geen veel duidelijker inzicht in de verschillende problemen.

Misschien geeft de driedimensionele voorstelling van geluid, zoals door P. Schaeffer [4] wordt voorgesteld, nog het duidelijkste beeld van de dynamische samenstelling van een klank. De grondtoon en de verschillende harmonischen worden voorgesteld door lijnen, die op drie onderling loodrecht op elkaar staande vlakken kunnen worden geprojecteerd (fig. 4a). De projecties op het dynamische vlak stellen de amplitudevariaties van de verschillende componenten van de klank voor als een functie van de tijd. De projecties op het melodische vlak laten de momentele waarden zien van de frequenties van de grondtoon en de harmonischen, ook weer als een functie van de tijd, terwijl de projecties op het spectrale vlak de sterkte van de verschillende componenten binnen het akoestische spectrum aangeven. Kortom: wat we verlangen van een High Fidelity installatie is, dat de driedimensionele voorstelling van het uitgangssignaal gelijk is aan die van het ingangssignaal, behalve wat betreft de toevoegingen en afwijkingen die zo gering zijn, dat ze met het gehoor niet zijn waar te nemen. Met andere woorden: de projecties op de drie vlakken mogen niet veel van vorm of plaats zijn veranderd en slechts kleine nieuwe vormen mogen op deze vlakken voorkomen.

In fig. 4b hebben we verschillende afwijkingen aangegeven. Wij zien, dat de lijnen in het melodische vlak iets verschoven zijn, wat betekent dat de hoogte van de toon is veranderd. De lijnen zijn ook golvend, wat meer of minder variatie in de toonhoogte betekent. In het spectrale vlak zien we, dat alle lijnen een andere amplitude hebben behalve die

voor de tweede harmonische. In het dynamische vlak is de opvallendste verandering, behalve de andere amplitude, dat de vorm van de kromme, die de tweede harmonische voorstelt, is veranderd tengevolge van enkele resonantieverschijnselen.



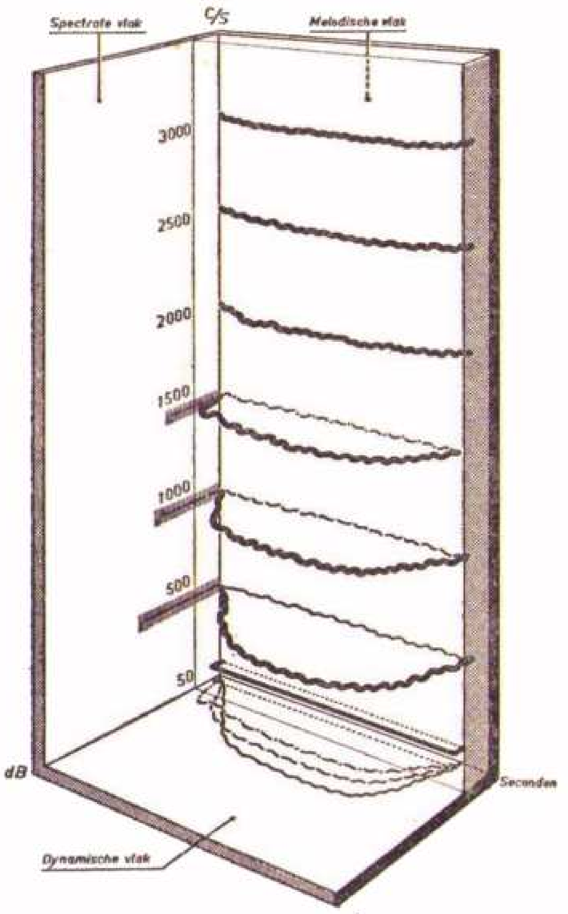


Fig. 4. *a*) Een driedimensionele voorstelling van een samengestelde klank.
b) Als *a*) maar met verschillende vervormingen van het signaal.

Er zijn ook nog enkele toevoegingen, waarvan die bij 2000, 2500 en 3000 Hz een gevolg zijn van vervorming, de 50 Hertz lijn is veroorzaakt door brom en gedreun en het vertikale blok geeft aan, dat er ruis optreedt. We zullen nu deze veranderingen en hun toelaatbare omvang nader onderzoeken. Alvorens in details te treden zullen we er nog even in het kort wat over zeggen.

a) *Vermogen.* Als de installatie geen weergave toelaat op het oorspronkelijke geluidsniveau, dan zal de weergave niet hetzelfde klinken als de oorspronkelijke muziek.
b) *Vervorming.* Niet-lineaire vervorming zal worden gehoord als ze boven een zekere grens uitkomt. Deze vervorming verbetert de ge-

luidskwaliteit gewoonlijk niet en moet daarom onder de grens van waarneming worden gehouden.

c) *Weergavekarakteristiek.* Als de amplitudeverhouding tussen de verschillende componenten van een geluidsgolf tijdens de weergave wordt veranderd, dan zal het gereproduceerde geluid een merkbaar verschil vertonen met het originele geluid als de verschillen in de weergavekarakteristiek boven een zekere waarde uitkomen. Deze verschillen kunnen over het hele frequentiegebied optreden of in sommige gevallen beperkt blijven tot een smalle frequentieband, nl. als ze worden veroorzaakt door resonanties.
We zullen niet nagaan of een afwijkende amplitudeverhouding onder speciale omstandigheden een aangenamer resultaat kan opleveren, maar alleen welke verschillen toelaatbaar zijn voordat zij kunnen worden gehoord.
De frequentiekarakteristiek zal niet alleen worden bekeken als een weergavekarakteristiek, maar ook met betrekking tot het vermogen dat bij verschillende frequenties beschikbaar moet zijn.

d) *Toonhoogte.* Als de hoogte van een gereproduceerde toon een zekere waarde verschilt van die van de oorspronkelijke toon, kan dit verschil worden waargenomen. De twee gevallen, die daarbij moeten worden beschouwd zijn een constant afwijkende toonhoogte en een variërend toonhoogteverschil. Dit laatste wordt, als het hoorbaar is, janken of zweven genoemd.

e) *Achtergrondbijgeluiden.* Als achtergrondbijgeluiden, die ergens in de installatie ontstaan een zekere grens overschrijden, worden zij hoorbaar en als hun niveau te hoog wordt, dan zullen er bezwaren tegen worden gemaakt. De voornaamste oorzaken van achtergrondbijgeluiden zijn: ruis, veroorzaakt door de versterkbuizen, transistoren, weerstanden, brom en dreun.

Of deze ongewenste verschijnselen al of niet kunnen worden gehoord hangt af van hun geluidsniveau, de akoestiek van de luisterruimte en het menselijk oor. Zij kunnen elkaar in zoverre wederkerig beïnvloeden dat, wanneer b.v. de basweergave van de luidspreker ontoereikend is, er meer brom in het elektrische signaal aanwezig kan zijn. Daar gestreefd wordt naar prima kwaliteit en een perfecte reproduktie zullen we echter, wanneer we een of ander punt nader beschouwen, in het algemeen aannemen, dat andere mogelijke fouten niet optreden.

De tot nu toe genoemde punten zijn alle vervormingen van elektrische of mechanische aard. Hierbij komen dan nog de akoestische factoren. Omdat we met twee oren horen en omdat dat geschiedt in min of meer terugkaatsende ruimten, moeten we ook rekening houden met:

f) *Stereofonie.* Wanneer een geluid wordt gereproduceerd door een enkele geluidsbron, terwijl de oorspronkelijke geluidsbron driedimensioneel was, dan zullen we het niet op dezelfde wijze waarnemen als het oorspronkelijke geluid. Dat zal een andere waardering van de muziek tengevolge hebben en kan zelfs een verschijnsel veroorzaken dat kan worden vergeleken met intermodulatievervorming.
g) *Ambiofonie.* Als de akoestiek van de luisterruimte verschilt van die van de concertzaal of de studio, dan zal er weer een verschil in waardering van de muziek optreden. Dit mogen we geen vervorming noemen, hoewel het een factor is, die van enig belang is.

HOOFDSTUK III

VEREISTE VERMOGEN

3-1. Het gewone geluidssterkteniveau

Hoewel reeds was vastgesteld dat voor een perfecte weergave het geluidssterkteniveau bij de luisteraar thuis hetzelfde moet zijn als dat in de concertzaal, is het toch de moeite waard eens na te gaan, waarom dat een essentiële voorwaarde is. Uiteindelijk wordt de prijs van een installatie voor een belangrijk deel beïnvloed door de hoeveelheid akoestische energie, die zij moet leveren. Vooral de luidsprekers, die in staat zijn een groot vermogen te verwerken kosten aanmerkelijk meer dan de kleinere typen met overeenkomstige weergavekarakteristieken.

Deze punten: het gewenste geluidssterkteniveau en vooral het gewenste vermogen van de versterker zijn aanleiding geweest tot veel dispuut.

Sommerville en Brownless hebben proeven genomen om vast te stellen aan welk geluidsniveau de luisteraars de voorkeur geven [5]. Zij maten het maximum geluidsniveau in dB boven 10^{-16} W/cm^2 (dit is de gemiddelde drempel van ons gehoor bij 1000 Hz), nadat de proefpersoon de geluidssterkte op de gewenste waarde had ingesteld. De proefpersonen waren vertegenwoordigers uit het gemiddelde publiek, technici, studiotechnici en musici. De ruimte waarin de proefpersoon zat was typerend voor de doorsnee huiskamer. Hun bevindingen zijn in tabel 3 opgenomen.

Tabel 3

	publiek		musici	technici	studiotechnici	
	mannen	vrouwen			mannen	vrouwen
Symfonische muziek	78	78	88	88	90	87
Lichte muziek	75	74	79	84	89	84
Dansmuziek	75	73	79	84	89	83
Spraak	71	71	74	80	84	77

De resultaten van deze proeven zijn misschien een beetje verwarrend. Voor zover het symfonische muziek betreft is de overeenstemming tussen musici, technici en studiotechnici bevredigend en doen ons geloven, dat

het gewone publiek er naast is. Betreft het lichtere muziek of spraak, dan zitten de voornaamste verschillen tussen de technici aan de ene kant en de musici en het grote publiek aan de andere kant. Blijkbaar houden de technici er altijd van als hun muziek luid is, het publiek heeft het altijd liever zachter en de musici prefereren alleen luide symfonische muziek.

Het is niet onmogelijk dat de „voorgeschiedenis", althans ten dele, een verklaring kan geven voor deze verschillen. De proeven werden genomen met zeer goede installaties, die een geluid produceerden dat veel beter was dan het overgrote deel van de luisteraars thuis ooit zal hebben gehoord. Dit geldt ook voor de musici, die radio-ontvangers en grammofoons bezitten, die niet beter, zo niet slechter zijn dan die van het doorsnee publiek.

Met een middelmatige installatie zal de voorkeur meestal uitgaan naar een gematigd geluidsniveau. De technici en vooral de studiotechnici zijn gewend aan „high fidelity" geluidsinstallaties, die bij grote geluidssterkte geen vervorming geven. Bij iedere proef, die in verhouding kort duurt, kunnen bestaande luistergewoonten een grote invloed uitoefenen op de resultaten. Wij weten niet of het musici uit symfonie-orkesten of van dansbands waren, maar de voorkeur voor een zekere soort muziek kan leiden tot een voorkeur voor zekere geluidsniveaus. Wij kunnen ons voorstellen dat een lid van een symfonie-orkest dansmuziek liever niet zo luid hoort, omdat hij er een hekel aan kan hebben. Andere factoren zijn natuurlijk, dat de proeven werden genomen met monofonisch geluid dat door slechts een luidspreker werd voortgebracht, waardoor de resultaten in sterke mate kunnen zijn beïnvloed en ook, dat de akoestische eigenschappen van de luisterruimte volkomen verschillend waren van die van een concertzaal.

Dit zijn twee factoren, die voor de meeste lezers van dit boek van belang zijn en waarop we later nog terug zullen komen. Aan de andere kant kunnen deze proeven en ook andere, waarbij dezelfde gedragslijn werd gevolgd, voor het doel van dit boek niet als beslissend worden beschouwd, omdat ons doel is de voorwaarden vast te stellen voor absolute getrouwheid.

3-2. Waarom geluidssterkte als in een concertzaal?

Er zijn echter een aantal argumenten ten voordele van reproduktie op het niveau van het oorspronkelijke geluid. In fig. 5 zijn de lijnen voor gelijke geluidssterkte getekend, zoals deze door Fletcher en Munson [6] zijn vastgesteld. Deze lijnen laten zien, dat de gevoeligheid van ons oor

alleen maar ongeveer constant is binnen beperkte frequentiegebieden en intensiteitsniveaus. In het grijs getekende gebied van fig. 5, dat het

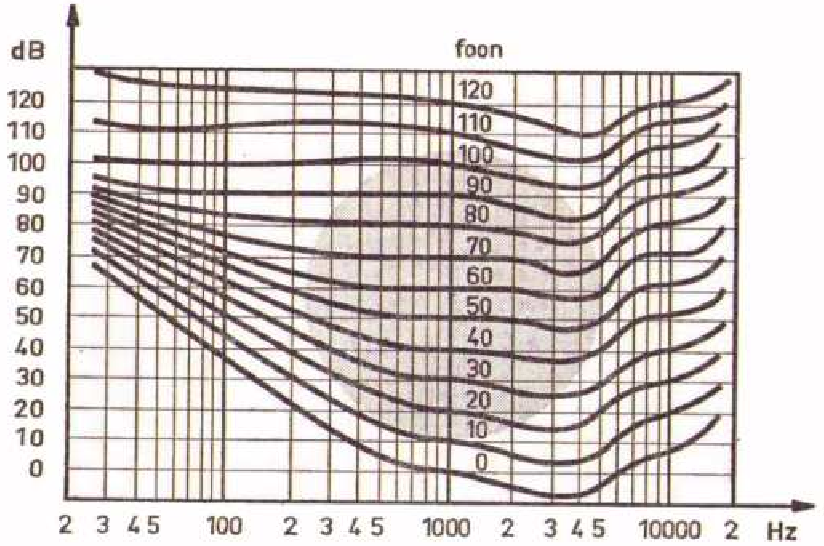


Fig. 5. Lijnen van gelijke geluidssterkte (luidheid). De parameters geven het geluidssterkte (luidheid) niveau aan. 0 dB = 10^{-16} W/cm^2.

zogenaamde centrale hoorbare gebied aangeeft, veroorzaken gelijke veranderingen in intensiteit ongeveer gelijke luidheidsveranderingen. Buiten de cirkel bestaat dit lineaire verband tussen intensiteit en luidheidsveranderingen niet.

Om de invloed van deze eigenschap van het oor nader te kunnen bestuderen hebben we figuur 6 getekend. Dat is een andere voorstelling

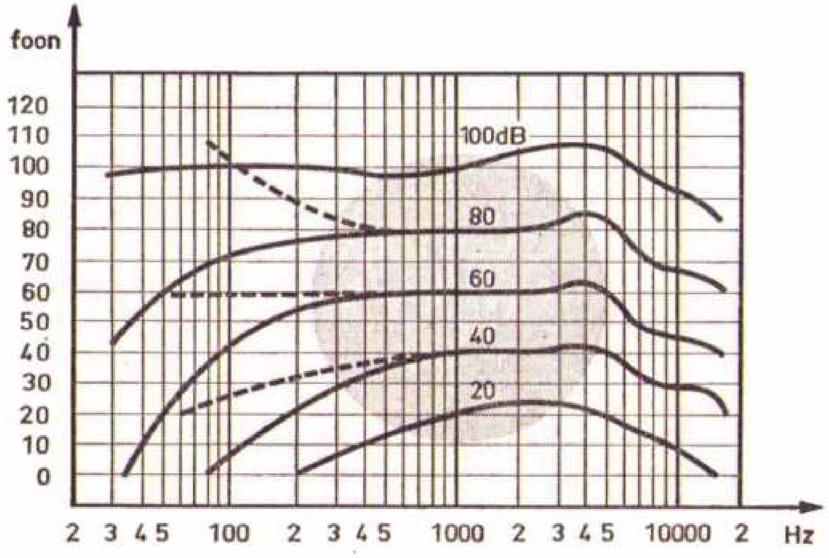


Fig. 6. Lijnen van gelijke intensiteit. De parameters geven het intensiteitsniveau aan.

van de vorige tekening. Hier geven de krommen de luidheid aan voor signalen van gelijke intensiteit. De lijnen voor gelijke intensiteit geven het timbre aan waarmee „witte ruis" *) zal worden gehoord, wanneer het op verschillende intensiteitsniveaus wordt gereproduceerd. Hieruit blijkt, dat als het niveau wordt verlaagd, de lage tonen component en in mindere mate ook de hoge tonen component van een samengestelde klank, zoals deze wordt waargenomen, zullen worden verzwakt. Laten we eens aannemen, dat muziek wordt voorgesteld door „witte ruis", waarvan de intensiteit varieert tussen 100 en 60 dB respectievelijk voor forte en pianissimo. De weergave wordt te luid bevonden en daarom wordt het niveau met 20 dB verlaagd. De intensiteitsgrenzen worden dan resp. 80 en 40 dB. Bij slechts weinig achtergrondbijgeluiden kunnen geen lagere frequenties dan ongeveer 200 Hz worden gehoord tijdens een pianissimo passage, terwijl op het oorspronkelijke niveau deze grens 50 Hz was. Om de hoorbaarheid van de frequenties tussen 50 en 200 Hz weer te herstellen moet de versterker de lage frequenties ongeveer 20 dB bij 100 Hz ophalen. Dan zullen echter bij fortissimo passages de lage frequenties eveneens meer worden versterkt. Tengevolge van het verbeteren van de lage frequenties bij het laagste reproduktieniveau, is het timbre bij het hoogste niveau ook veranderd (streeplijnen in fig. 6). Dat wil dus zeggen, dat zowel met als zonder fysiologische correctie het timbre van het gereproduceerde geluid afwijkt van het oorspronkelijke geluid als de intensiteitsniveaus niet aan elkaar gelijk zijn. Dit heeft invloed op het vaststellen van het vermogen van de versterker. Zoals in hoofdstuk V zal worden aangetoond is de invloed, die dit ophalen van de lagere frequenties heeft, dat, niettegenstaande het lagere gemiddelde geluidsniveau, het vermogen van de versterker en de luidsprekers hetzelfde blijven als voor reproduktie op een niveau van 100 dB.

We moeten er op wijzen, dat er enige twijfel over bestaat of de krommen van Fletcher en Munson inderdaad een beeld geven van normaal horen, omdat ze werden vastgesteld in een tijd, dat de laboratoriuminstrumenten nog niet zo nauwkeurig waren als tegenwoordig. Andere onderzoekers hebben dan ook krommen gepubliceerd, die afwijken van die, welke in fig. 5 zijn getekend. De verschillen zijn echter zo klein, dat zij slechts zeer weinig invloed uitoefenen op de conclusies, die in de vorige alinea zijn getrokken.

---

*) Witte ruis, een complexe toon waarin alle frequenties even sterk zijn.

Ook een ander verschijnsel kan nog de waardering van een muzikale toon, die op een andere dan de oorspronkelijke luidheid wordt gereproduceerd, beïnvloeden. Wij geloven, dat dit van nog groter belang is, hoewel er gewoonlijk slechts weinig aandacht aan wordt besteed. De hoogte van een toon hangt niet alleen af van zijn frequentie, maar ook van de luidheid. Dit is aangetoond door Stevens [7], wiens bevindingen in fig. 7

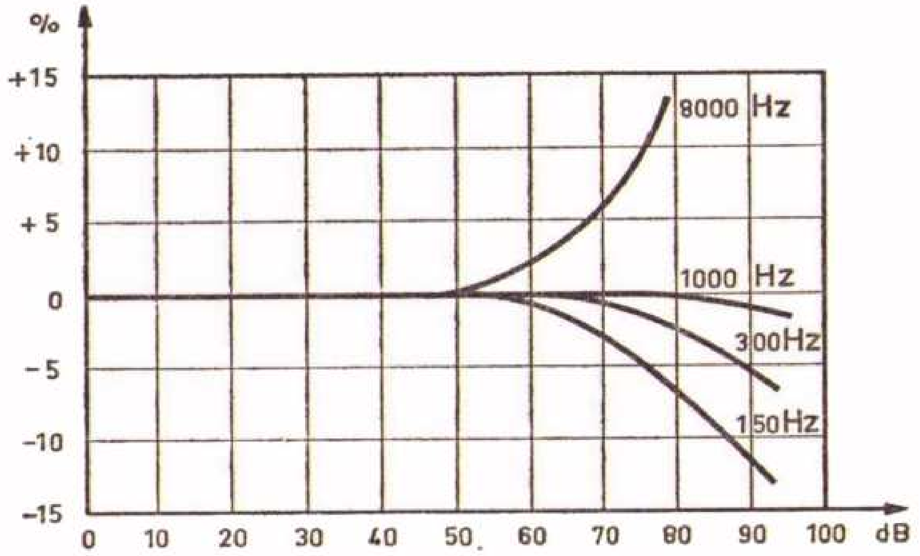


Fig. 7. Verandering van de toonhoogte als functie van de intensiteit. De parameters geven de frequentie aan.

zijn weergegeven. De tonen met een frequentie van omstreeks 1000 Hz veranderen niet merkbaar als hun intensiteit groter wordt. Bij hogere tonen zal de schijnbare toonhoogte toenemen als het intensiteitsniveau boven de 60 dB komt. De verhoging kan dan 15% of meer bedragen. Voor de lage tonen zal de hoogte afnemen en hierbij zijn veranderingen tot 10% mogelijk.

Twee tonen, die harmonisch klinken bij lage luidheidsniveaus zullen harmonisch blijven als van een of van beide tonen de luidheid wordt vergroot, zelfs als ze bij het nieuwe luidheidsniveau schijnbare toonhoogten hebben, waarvan we mogen veronderstellen dat ze disharmonisch zullen zijn. Harmonisch of disharmonisch hangen geheel af van de hoogte van de frequenties en niet van de hoogte van de toon. Hieruit volgt dat geen disharmonie behoeft te worden gevreesd als het luidheidsniveau van muziek wordt veranderd.

De verandering in hoogte van de componenten van de samengestelde klank, die optreedt als de luidheid van deze toon wordt veranderd, veroorzaakt een timbreverandering. Dit verschijnsel treedt op als het intensiteits-

niveau boven 60 dB uitkomt, dat is ongeveer het pianissimoniveau in een concertzaal (zie tabel 4). Tengevolge van het feit, dat het harmonische verband van de verschillende tonen niet door dit verschijnsel wordt beïnvloed, zal de luisteraar het niet bewust waarnemen. Dat wil niet zeggen, dat het van geen belang is. De klaarheid van delen van enkele composities, waarbij het gehele orkest fortissimo speelt is voor een groot deel toe te schrijven aan dit feit. Bij toenemende luidheid worden de lagere en hogere toonhoogtegrenzen van een samengestelde klank blijkbaar over een groter gebied verspreid. Het uiteindelijke effect gaat voor een deel verloren wanneer hetzelfde geluid met een lagere intensiteit wordt gereproduceerd. Door het ophalen, dus versterkt weergeven, van de tonen van de lagere en vooral de hogere frequenties kunnen we trachten het verlies in klaarheid te camoufleren. De uitwerking van een dergelijke kunstgreep is niet dezelfde en bovendien zal het ophalen van de hoge tonen de muziek scherp doen klinken als niet fortissimo wordt gespeeld.

Zelfs een inrichting voor contrastexpansie voor de lage en hoge tonen kan, hoe duur deze ook is, niet volkomen het verlies in klaarheid, dat ontstaat door het reproduceren van muziek op een luidheidsniveau dat ligt beneden dat van het oorspronkelijke, herstellen. Hieruit volgt, dat perfecte weergave het luidheidsniveau van de concertzaal eist.

3-3. Hoeveel watt?

Veel onderzoekers hebben de niveaus van de geluidsintensiteit, die in een concertzaal optreden, vastgesteld. De metingen werden meestal uitgevoerd vlak bij de voorste rijen stoelen, dus dicht bij het orkest. De meest voorkomende waarde voor de maximale luidheid is 95 foon en Leopold Stokowski bepaalde het verband tussen de muzikale notatie en de uitslag van de foonmeter [8]. Dit verband is aangegeven in de beide eerste kolommen van tabel 4.

Tabel 4

	foon	dB
ppp	20	40
pp	40	50
p	55	60
mf	65	70
f	75	80
ff	85	90
fff	95	100

Voor verdere berekeningen hebben we meer aan het intensiteitsniveau dan aan de luidheid. In het geval van reproduktie van witte ruis, maar ook als het om muziek gaat (zie fig. 26) kunnen we aannemen dat het topvermogen gelijkmatig verdeeld is over het gehele frequentiegebied. Dus kan, met een in vergelijking slechts kleine fout, worden gezegd, dat het luidheidsniveau van 95 foon wordt veroorzaakt door een geluid met een intensiteit van 95 dB boven 10^{-16} W/cm^2. Voor lagere niveaus zal de waarde van de intensiteit waarschijnlijk iets hoger liggen dan de waarde van de luidheid.
De waarden in de tweede kolom van tabel 4 stellen de maximum waarden van de aflezingen van de foonmeter voor en geven niet de werkelijke topwaarden aan, omdat de traagheid van dit instrument voorkomt, dat de naald toppen van korte duur volgt. Over het algemeen zullen toppen, die minder dan 400 milliseconden duren, niet juist worden aangegeven. Mits de toppen langer duren dan minstens 30 milliseconden zullen ze echter een hoorbaar effect opleveren en daaruit volgt, dat het vermogen dat een installatie moet leveren, zonder dat hoorbare vervorming optreedt, zal worden beïnvloed door de grootte van deze toppen.

De topfactor, dat is de waarde waarmee het werkelijke topvermogen de aflezing van de *VU* meter overschrijft, is bestudeerd door McKnight, die 76 opnamen van muziek analiseerde [9]. Hierbij bleek dat topfactoren tot 10 dB kunnen optreden, bij 50% van de opnamen kwam, zoals fig. 8

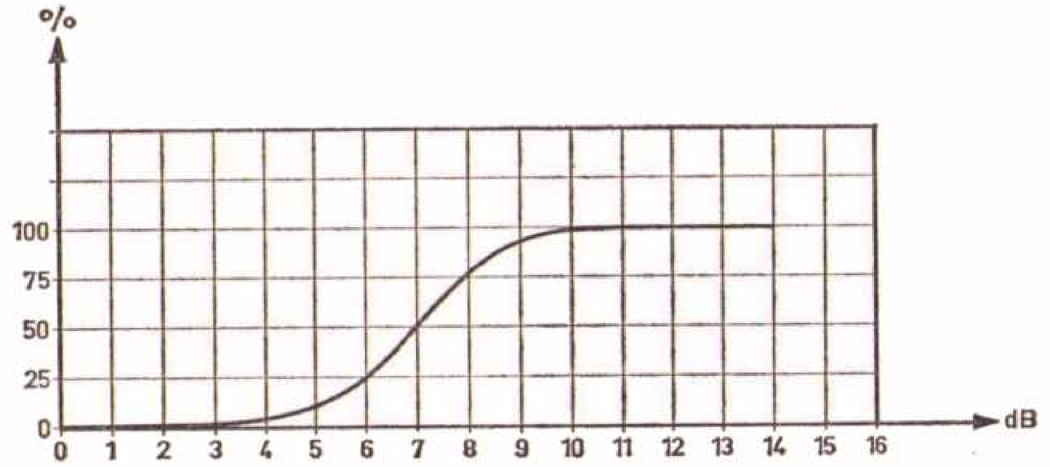


Fig. 8. Verdeling van de topwaarden voor zeer uiteenlopende muziek.

laat zien, de topfactor uit boven 6 dB. Om dus vervorming te voorkomen moet de installatie in staat zijn een intensiteitsniveau van 95 + 10 = = 105 dB te leveren.

De waarde 95 foon geldt voor de voorkant van de concertzaal, dicht bij het podium van de dirigent. Dit is niet noodzakelijk de beste plaats om naar een orkest te luisteren. Sommerville en Gilford hebben het verschil gemeten tussen de geluidsniveaus op de voorste en achterste plaatsen in vijf concertzalen in Engeland [10]. Uit hun resultaten zien we, dat het geluidsniveauverschil gemiddeld ongeveer 8 dB is en dat het verschil praktisch onafhankelijk is van de frequentie.

Hieruit volgt, dat we kunnen aannemen dat in het midden van een concertzaal de geluidsintensiteit voor de toppen ongeveer 105 — 4 = 101 dB of afgerond 100 dB zal bedragen. Deze laatste waarde vinden we in de derde kolom van tabel 4, tezamen met de geschatte waarden voor de intensiteit bij lagere luidheidsniveaus.

Uit deze getallen moet het gewenste akoestische vermogen en dus het elektrische vermogen worden berekend.

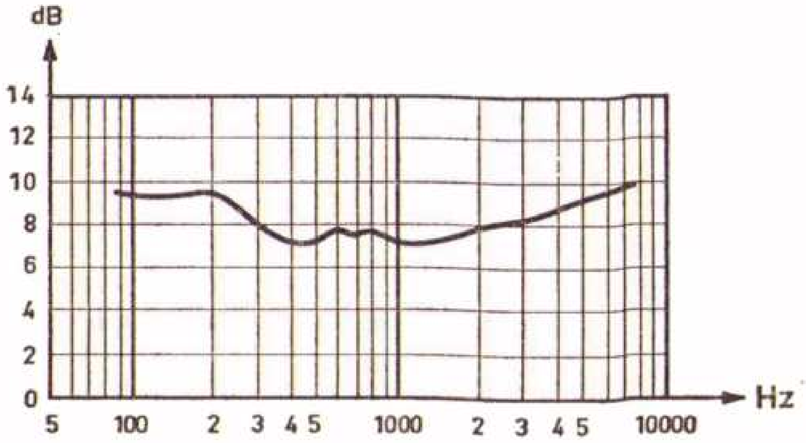


Fig. 9. Geluidsniveauverschillen tussen zitplaatsen voor en achter in de zaal, gemiddelde van vijf concertzalen.

De geluidsdruk in een ruimte is een functie van de akoestische energie, die wordt uitgestraald door de geluidsbron en van de akoestische eigenschappen van die ruimte, waarvan de voornaamste zijn haar afmetingen en haar nagalmtijd. De werkelijke geluidsdruk in een bepaald punt en op een bepaald ogenblik is gelijk aan de som van de directe straling en van het weerkaatste geluid.

De intensiteit van het directe geluid kan als volgt worden berekend: De trillingssterkte op een afstand R cm van een geluidsbron, die W watt akoestische energie uitstraalt, is:

$$I_r = \frac{W}{4 \pi R^2} \text{ W/cm}^2$$

Stel dat het vermogen $W = 1$ watt, dan zien we dat het geluidsniveau op 300 cm zeer dicht bij 10^{-6} w/cm² ligt of 100 dB boven 10^{-16} W/cm² enz.

Als de oppervlakte van de ruimte S is en de gemiddelde absorptiecoëfficiënt α dan kan het verband tussen het akoestische vermogen W en de intensiteit van het gereflecteerde geluid (I_r) worden voorgesteld door:

$$W = I_r \times S \times \alpha$$

De waarde van S en α zullen aanmerkelijk verschillen voor de ene ruimte en de andere.

De nagalmtijd zal echter aanmerkelijk minder verschillen, aangezien zelfs in een kleine goed gemeubileerde kamer het niet waarschijnlijk is, dat deze minder dan 0,5 seconde zal zijn, terwijl deze in de grootste concertzaal niet boven 2 seconden zal uitkomen.

De nagalmtijd van een ruimte zal zijn:

$$T = 1{,}6 \times 10^{-3} \cdot \frac{V}{S\alpha} \text{ seconde.}$$

waarin

V = inhoud van de ruimte in cm³,

zodat $$W = \frac{1{,}6 \times 10^{-3} \cdot I \cdot V}{T} \text{ watt,}$$

of, als V wordt uitgedrukt in m³:

$$W = \frac{1{,}6 \times 10^{3} \cdot I \cdot V}{T} \text{ watt,}$$

waaruit volgt:

$$I_r = \frac{WT}{1{,}6V} \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$$

Een gemiddelde waarde voor de nagalmtijd in huiskamers is $T = 0{,}75$ sec. Ook in goede concertzalen met een inhoud tot 1000 m³ en in studio's zal de nagalmtijd dicht bij de 0,75 sec. liggen. Door $T = 0{,}75$ in bovenstaande formule te substitueren vinden we, dat in een ruimte met een inhoud van 100 m³ een geluidsbron, die 1 watt akoestische energie uitstraalt, een geluidsintensiteit van

$$I_r = 4{,}5 \times 10^{-6} \text{ W/ cm}^2,$$

dat is 107 dB boven 10^{-16} W/cm², zal veroorzaken.

Het gereflecteerde geluid zal niet direct de berekende waarde bereiken, maar zal geleidelijk in T seconde toenemen tot deze waarde, vooropgesteld, dat de geluidsbron gedurende deze gehele periode een constant signaal

uitzendt. Dat zal niet altijd het geval zijn en de werkelijke geluidsdruk zal dan afhangen van de signaalschommelingen.

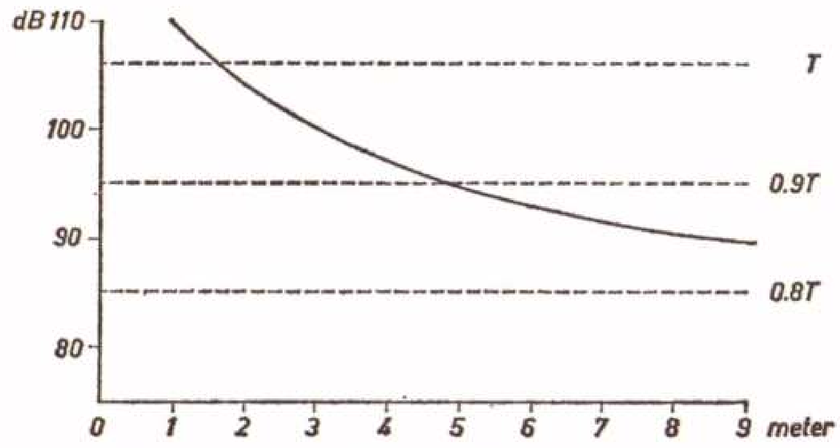


Fig. 10. Intensiteit van het directe geluid als functie van de afstand tot de luidspreker (getrokken lijn) en van het gereflecteerde geluid met de tijd als parameter (streeplijn).
T = nagalmtijd, inhoud van de kamer 100 m³, akoestisch vermogen 1 watt.

In fig. 10 is de geluidsdistributie over een ruimte getekend. Hieruit wordt het duidelijk, dat het voor geluiden, die korter duren dan ongeveer $\frac{3}{4}\,T$, het directe geluid is dat hoofdzakelijk het uiteindelijke geluidsniveau bepaalt, maar voor geluiden die langer duren is dat het indirecte geluid. In aanmerking nemend, dat de topwaarden wel tot ca. 0,5 sec. kunnen aanhouden is het veilig aan te nemen, dat de geluidsintensiteit in het overgrote deel van de ruimte zal worden bepaald door het gereflecteerde geluid. In dat geval kan het vereiste vermogen worden afgeleid uit de formule

$$W_a = 1{,}6 \times 10^3 \frac{V\,I}{T} \text{ watt.}$$

Wanneer het rendement van de luidspreker η is en er wordt W_e watt toegevoerd aan de spreekstoel, dan zal het akoestisch vermogen gelijk zijn aan $W_a = \eta W_e$. De naar de achterzijde uitgestraalde energie zal echter grotendeels door de kast worden geabsorbeerd, behalve voor een smal frequentiegebied in basreflexkasten, zodat de werkelijk uitgestraalde energie gelijk is aan

$$\frac{\eta}{2} \times W_e$$

Hieruit volgt, dat de vereiste elektrische energie voor een niveau I gelijk is aan

$$W_e = 3{,}2 \times 10^3 \frac{V\,I}{\eta\,T} \text{ watt.}$$

dus b.v. 10 watt in het geval dat een luidspreker, waarvan $\eta = 0{,}05$ wordt gebruikt in een ruimte van 100 m^3 en het geluidsniveau 100 dB boven 10^{-16} W/cm^2 ligt. In fig. 11 zijn krommen voor $W_e = f(V)$ getekend, waarbij de geluidsintensiteit als parameter is gebruikt.

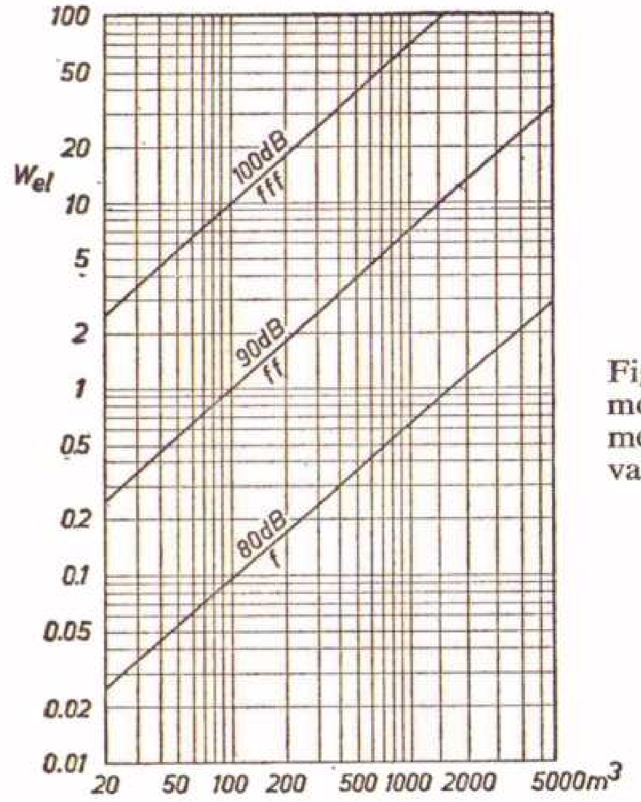


Fig. 11. Het gewenste elektrische vermogen voor een luidspreker met een rendement van 5 % als functie van de inhoud van de ruimte.

In het bovenstaande hebben we aangenomen dat het luidsprekerrendement 5% is. Waarden voor het rendement van luidsprekers worden vrijwel nooit gepubliceerd en daardoor ontstaan nog al eens misvattingen daarover. De tijd, dat een rendement van 1% als maximum gold is lang geleden. De werkelijke waarden lopen van 1% voor luidsprekers in kleine draagbare ontvangers tot 15% voor een 30 cm luidspreker uit een radiogrammofoon. Een goede gemiddelde waarde is 5%, maar we moeten ons wel goed realiseren, dat een indrukwekkend grote magneet nog niet wil zeggen, dat de luidspreker een hoog rendement heeft. De kwaliteit van het magneetstaal en de nauwkeurigheid van het ontwerp van het magnetische circuit zijn belangrijker factoren dan louter massa.

Voor frequenties tot aan 2000 Hz is het stralingsdiagram van de luidspreker cirkelvormig, boven deze grens wordt het geluid gebundeld. Bij nog hogere frequenties zal het rendement langzamerhand min of meer afnemen. De bundeling is er oorzaak van dat het directe geluid in ver-

houding belangrijker wordt ten koste van het gereflecteerde geluid en daardoor zal in de richting van de as de geluidsdruk ongeveer constant blijven tot het rendement van de luidspreker afneemt. Bij sommige typen luidsprekers zal het rendement constant blijven tot aan 12000 Hz. Dat betekent een geleidelijke toeneming van de axiale weergave tot op zijn minst deze frequentie. Bij de Philips luidspreker 9710 M bijvoorbeeld is de axiale geluidsdruk bij 8000 Hz ongeveer 6 dB groter dan die bij 200 Hz, maar het oppervlak van het polaire diagram is ca. 6/10 van dat bij lagere frequenties, zodat de uitgestraalde energie inderdaad iets groter is geworden. Fig. 12 laat zien hoe het schijnbare rendement van deze luidspreker afhangt van de frequentie wanneer hij in een akoestische box is ondergebracht.

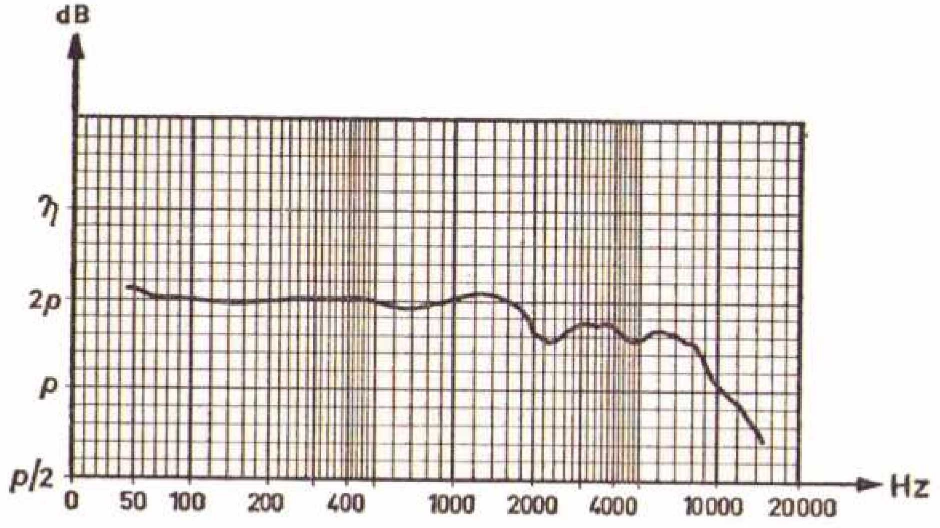


Fig. 12. Het rendement van de luidspreker 9710 M als functie van de frequentie.

Tot nu toe hebben we steeds het geval beschouwd van symfonische muziek voortgebracht door zo'n 80 tot 100 musici. In uitzonderingsgevallen kan het orkest nog groter zijn of versterkt met een koor, maar dat beïnvloedt de getallen niet zo veel, omdat een tweemaal zo groot orkest slechts een verdubbeling van het vermogen nodig maakt. Het werkelijke topvermogen van een orkest van 75 man is ongeveer 60 akoestische watts en dat van een koor bestaande uit 75 zangers ligt in de buurt van 2 watt, zodat de toevoeging van een koor aan het orkest geen groter vermogen vergt.

Deze redenering kan niet omgekeerd worden gevolgd, dus niet zodanig, dat als er 10 watt nodig zijn voor de reproduktie van een orkest van 100 man, er voor de reproduktie van een solo instrument maar 1/100 van

10 watt, dat is 0,1 watt, nodig zou zijn. Voor solo instrumenten en kleine ensembles moet het feit onder ogen worden gezien, dat deze ook in veel kleinere ruimten kunnen optreden. In dat geval zal het geluidsniveau hoger liggen dan wanneer de uitvoering plaats vindt in een grote omroepstudio of concertzaal. Hier kunnen we dus kiezen tussen twee verschillende niveaus: het niveau van het instrumentale geluid in de concertzaal of het geluidsniveau dat hetzelfde instrument zou voortbrengen in een huiskamer. Dat is natuurlijk een kwestie van smaak, maar de uiteindelijke keuze zal ook afhangen van het feit of de luisteraar misschien eenzelfde instrument in zijn eigen huiskamer heeft. Als dit het geval is, dan is het logisch dat hij de piano of de vioolklank op gelijke sterkte wil reproduceren als de klanken van de oorspronkelijke instrumenten.

De topvermogens van verschillende muziekinstrumenten en enkele orkesten zijn gemeten door Sivian, Dunn en White [11].

Uit de resultaten daarvan is tabel 5 opgesteld. Daar de topmeters, die voor deze proeven werden gebruikt waren voorzien van thyratrons, kunnen we aannemen, dat deze waarden zuivere topwaarden zijn en ook rekening houden met de toppen van korte duur.

Tabel 5

	topvermogen in akoestische watts	topvermogen * in elektrische watts
triangel	0,050	1
klarinet	0,050	1
waldhoorn	0,053	1,1
fluit	0,055	1,1
piccolo	0,084	1,7
contrabas	0,156	3,1
bombardon	0,206	4,1
bassaxofoon	0,288	5,8
trompet	0,314	6,3
piano	0,437	8,7
grote trom	1,2 — 24,6	24 — 492 **
trombone	6,4	128 **
bekkens (37,5 cm)	9,5	190 **
kleine trom	11,9	238 **
pijporgel	12,6	252 **
orkest (15 man)	9,-	180 **
orkest (75 man)	66,5	1330 **

* voor een luidsprekerrendement van 5%.
** deze getallen gelden voor vermogens, die nodig zijn voor concertzalen. Voor huiskamers $P = 0,1\ V$, waarin V is uitgedrukt in m^3.

Uit het laatste getal in deze tabel komen we tot de conclusie, dat een versterker in een concertzaal 1300 W zou moeten leveren aan luidsprekers met een rendement van 5%. Uitbreiding van fig. 11 laat zien, dat dit vermogen ruim voldoende is om een zaal met een inhoud van ca. 15.000 m^3 te vullen. Dit is b.v. de grootte van de „Philharmonic Hall" in Liverpool en de „Concert Hall' in Kopenhagen. Voor de reproduktie van een orkest van 15 man zou 180 W nodig zijn, wat volgens fig. 11 het vermogen is voor een zaal van 2000 m^3 zoals de BBC studio I in Swansea en de BBC Maida Vale studio 2 te Londen. Deze waarden tonen aan dat de gegevens, die in tabel 5 en fig. 11 zijn verzameld, niet met elkaar in tegenspraak zijn.

Een piano, een instrument, dat in veel huiskamers wordt aangetroffen, zou moeten worden weergegeven met een vermogen van 8,7 watt. Dit is het vermogen dat nodig is voor de reproduktie van orkestmuziek in een ruimte van 100 m^3. Met andere woorden: een piano, die fortissimo bespeeld wordt in een huiskamer zal ongeveer even luid klinken als een orkest in een concertzaal. Bij een door de schrijver genomen proef in een ruimte van 96 m^3 waren de topluidheidsniveaus, die door een gewone piano werden voortgebracht, 70 foon bij mezzoforto, 87 foon bij forto en 95 foon bij fortissimo. Een opname van hetzelfde pianowerk, die in een overeenkomstige ruimte werd afgespeeld leverde praktisch dezelfde luidheidscijfers op. De versterker was uitgerust met een katodestraal niveau indicator, die aangaf wanneer een vermogen van 10 W was bereikt en voortdurend oplichtte bij 11 watt. Het 10 watt niveau werd verschillende malen bereikt tijdens het terugspelen van de opname, maar het 11 watt niveau werd geen enkele maal overschreden. Daarna werd een opname van een orkest gespeeld met een top luidheidsniveau van 95 foon. Weer lag het topvermogen van de versterker tussen 10 en 11 watt. Het rendement van de luidspreker bedroeg 4%, zodat de werkelijke akoestische vermogens even beneden de berekende waarde bleven. De overeenstemming was echter voldoende groot om te kloppen zowel met fig. 11 als tabel 5.

De conclusie uit het bovenstaande is dus dat de getallen in de rechterkolom van tabel 5 het gewenste *onvervormde* uitgangsvermogen aangeven van een versterker waarop een luidspreker is aangesloten met een rendement van 5 %, geplaatst in een ruimte met een nagalmtijd van 0,75 sec. Voor andere ruimten of luidsprekers moeten de waarden voor de reproduktie van orkestmuziek worden vermenigvuldigd met $\frac{3,75}{\eta\ T}$

waarin η is het rendement uitgedrukt in procenten en T de nagalmtijd in seconden. Voor instrumentale solo's is de correctiefactor $\frac{5}{\eta}$ omdat hier de nagalmtijd buiten beschouwing moet blijven.

3-4. Hoe staat het met de buren?

Opgemerkt kan worden, dat de waarden van het vermogen laag schijnen te zijn en de geluidsintensiteitsniveaus hoog. We moeten ons echter realiseren, dat de output van de luidspreker zonder hoorbare vervorming moet zijn, dit is een vrij zware eis en niet iedere 10 watt versterker-luidsprekercombinatie kan op vol vermogen werken zonder vervorming. Is de installatie ontworpen voor een vermogensreserve van 3 dB, dan is het elektrische uitgangsvermogen al tot 20 W gestegen!

Als daarenboven de lage- of de hoge tonen weergave is opgehaald nl. om het afnemen van het rendement van de luidspreker aan de beide uiteinden van het weergavegebied te compenseren, dan wordt het vermogen, dat de luidspreker vraagt, evenredig met de grootte van de extra versterking, groter, dat wil zeggen 3 dB of een factor 2 voor het 3 dB ophalen van de lage of hoge tonen en een factor 4 voor het 6 dB ophalen. Dat wil zeggen, dat bijvoorbeeld een 6 W versterker, waarbij de bassen 6 dB worden opgehaald om het verlies van bassen door een te kleine luidsprekerschermplaat te compenseren, ernstig zal worden overbelast. Hieruit kunnen we leren, dat foons veel en veel duurder zijn dan dB's.

Een top geluidsniveau van 100 dB doet ons onszelf afvragen of er ook een maximum is voor het gewenste akoestische vermogen, dat niet wordt bepaald door de eisen van getrouwheid, maar door de eisen van het burgerschap. Het mag natuurlijk niet voorkomen dat de muziek op een zodanig geluidsniveau wordt gereproduceerd, dat hierdoor burengerucht wordt veroorzaakt. Het is altijd moeilijk vast te stellen wat burengerucht is. Er zijn geen klachten mogelijk als het geluid van de muziek de buurman bereikt op een niveau, dat gelijk is aan het gemiddelde niveau van de omgevingsgeluiden. Dit laatste zal ongeveer 30 tot 45 dB boven de gehoordrempel liggen, afhankelijk van de omgeving. Dat wil zeggen, dat de muren, die de kamer van de luisteraar scheidt van die van de buurman het doorklinkend geluid gemiddeld ongeveer 60 dB moeten verzwakken. Dat is meer dan de normale bouwmaterialen kunnen doen en daaruit volgt,

dat het alleen in vrijstaande huizen met gesloten vensters mogelijk zal zijn de muziek op natuurlijke sterkte te spelen zonder de buren te hinderen.

De schrijver loste dit probleem zonder bezwaren van zijn buren voor zichzelf op door hen uiteen te zetten, dat zijn grammofoonmuziek bij zijn buurman niet harder zou doordringen dan het geluid van hun piano in zijn huis. Daar grammofoonopnamen met dezelfde luidheid worden gespeeld als een echte piano is dat alleen mogelijk als de voortplantingscondities voor elektro-mechanisch gereproduceerde muziek dezelfde zijn als voor echte muziek.

In tabel 6 zijn de voortplantingsverliezen (verzwakkingswaarden) van verschillende akoestische- en bouwmaterialen opgenomen.

Tabel 6

Materiaal	gemiddeld voortplantingsverlies in dB
houten stijlen, tengellatten, pleisterkalk	43
deur (licht) 4 panelen	22
deur (eiken)	25
baksteen, steens muur, aan beide kanten bepleisterd	51
baksteen halfsteens muur, aan beide kanten bepleisterd	45
vensterglas 6 mm	30
hardboard beschot	30
holle cementtegels, aan beide kanten bepleisterd	37
holle lemen tegels, aan beide kanten bepleisterd	42
karpet 12 mm	6
haarvilt 10 mm	14
celotex normaal 12 mm	20

We zien hieruit, dat een bakstenen muur, die aan beide kanten bepleisterd is, zoals het gebruikelijke type muur is tussen twee naast elkaar liggende huizen of flats, 50 dB verzwakking geeft. Wanneer in een van de beide huizen muziek wordt gemaakt of gereproduceerd met een topniveau van 100 dB, dan zullen de topniveaus in het andere huis niet boven 50 dB uitkomen. Het gemiddelde niveau zal natuurlijk nog lager zijn en misschien wel overstemd worden door het omgevingslawaai, waaraan het natuurlijk zelf ook bijdraagt. Dit lijkt aanvaardbaar. De voortplantingsverliezen in het plafond, wanneer dat bestaat uit een houten vloer op balken en aan de onderzijde met een laag kalk bepleisterd, zijn ongeveer 43 dB, zodat kamers direct boven of onder de luisterruimte ernstiger gestoord zullen worden. Een kleed zal natuurlijk nog enige verbetering geven en nog eens 5 dB toevoegen aan de voortplantingsverliezen, die dan ongeveer gelijk

zullen zijn voor muren en plafonds. Helaas hebben beton- en gemetselde vloeren en andere bouwmaterialen geen gunstige geluidisolerende eigenschappen, een feit dat veel ergernis geeft aan veel flatbewoners, ook al spelen hun buren noch grammofoon, noch piano. Daar komt nog bij dat er een neiging bestaat steeds dunnere en kleinere kleden te gebruiken en wel om de heel eenvoudige reden dat een zwaar, flink groot tapijt wel haast net zoveel kost als een complete meubilering. In principe zijn de voortplantingsomstandigheden voor oorspronkelijke en gereproduceerde muziek hetzelfde, maar dat blijkt in de praktijk niet altijd het geval te zijn.

De schrijver nam een aantal proeven in zijn eigen huis en in dat van zijn buren. De proeven werden genomen met echte pianomuziek en opgenomen orkestmuziek.

Wanneer de luidsprekerkasten goed gedempt en zwaar gebouwd waren, was het doordringingsvermogen van het geluid van de ene kamer in de andere hetzelfde voor oorspronkelijke en voor gereproduceerde muziek. Dus waren er voor de pianospelende buurman niet meer redenen tot klagen dan voor de grammofoonspelende auteur, behalve dan natuurlijk, dat een grammofoon niet zou gauw moe is als een pianist!

Werd een lichtere luidsprekerkast gebruikt, die niet vrij was van resonantie, dan was de voortplanting door vloeren en muren veel beter. Een lichtgebouwde luidsprekerkast zal, vooral bij de lagere frequenties in trilling geraken en deze brengen de vloer weer veel beter in trilling dan de geluidsgolven, die door de conus van de luidspreker worden uitgestraald. Het „contact-geluid"-verlies, dat dan belangrijker wordt dan het voortplantingsverlies, is aanmerkelijk kleiner, vooral bij tegel- en betonvloeren. Meestal ligt dat in de orde van 10 tot 20 dB. Dit is des te erger omdat de voortplantingsverliezen juist het kleinst zijn voor de lage frequenties. Het plaatsen van de luidsprekerkast op een dikke laag haarvilt kan de zaak voor de buren gunstiger maken. Met minderwaardige luidsprekerkasten is het gevaar voor hinder niet theoretisch. Hieruit volgt, dat het gebruik van een goede luidsprekerkast, die vrij is van resonanties, even belangrijk is voor de kwaliteit van het geluid in de kamer van de luisteraar als voor de afwezigheid daarvan in de kamer van de buren.

HOOFDSTUK IV

NIET-LINEAIRE VERVORMING

4-1. Subjectieve vervorming

Niet-lineaire vervorming treedt onvermijdelijk op in iedere schakel van de elektro-akoestische keten van microfoon tot luidspreker.

Haar invloed is moeilijk na te gaan aangezien deze afhangt van de amplitude en van de frequentie-inhoud van het signaal. Men raakt er niet aan gewend, zoals aan sommige bedwelmende middelen of aan overdreven lage tonen of onderdrukte hoge tonen. Mensen kunnen jarenlang geluisterd hebben naar een versterker, die een behoorlijke portie vervorming produceert, maar ze zullen, als ze de kans krijgen het te beluisteren, direct onvervormd geluid de voorkeur geven. Maar dezelfde mensen zullen niet direct overtuigd zijn door de betere weergave van de hoge tonen door FM ontvangers, als ze daarvoor nooit anders hebben gehoord dan muziek via een AM kanaal.

Vervorming kan niet worden voorkomen, maar zij kan wel worden teruggebracht tot beneden de hoorbaarheidsdrempel. Er is in verhouding weinig bekend over deze drempel. Het probleem kan op verschillende manieren worden benaderd. Om te beginnen kan worden vastgesteld, dat, zolang de geluidsdruk, die door de vervorming wordt veroorzaakt beneden de hoorbaarheidsgrens blijft, de vervorming niet kan worden gehoord. Dit zou betekenen (zie fig. 5) dat de vervorming 100 dB beneden het maximale muziekniveau zou moeten blijven, dat wil zeggen dat de vervorming niet meer mag bedragen dan 0,001%. Gelukkig behoeft niet aan deze uitzonderlijk moeilijke eis te worden voldaan.

Om te beginnen zijn de omstandigheden in een woonkamer, studio of concertzaal nooit zodanig, dat zeer zwakke geluiden kunnen worden gehoord, zij zullen verdrinken in de niet te voorkomen achtergrondbijgeluiden. Zelfs in studio's zal dat niet veel onder de 33 dB liggen, die reeds eerder voor een stil huis werden vermeld. Deze bijgeluiden zijn niet hetzelfde over het gehele hoorbare gebied, maar het sterkste bij de lage frequenties en omdat veel vervorming boven de 500 Hz ligt zal het maskerende effect van de achtergrondbijgeluiden niet groot zijn voor ver-

vorming. Als de bijgeluiden voor alle frequenties gelijk zouden zijn, dan zou tot en met 0,04% vervorming er door worden gemaskeerd. Zoals de zaken echter staan is 0,02% juister, hoewel verderop zal blijken, dat de aanwezigheid van laagfrequentiebijgeluid een zekere invloed zal hebben op de hoorbaarheid van een van de ernstigste vormen van vervorming.

De aanwezigheid van het gewenste geluid zal echter tot op zekere hoogte de vervorming maskeren en daarom zal vervorming, die wel zou worden gehoord als ze alleen optrad, niet bemerkt worden als het geluid, waaruit de vervorming voortkomt ook aanwezig is. Dit zal later in dit hoofdstuk uitvoerig worden besproken.

Niet alleen de elektro-akoestische installatie veroorzaakt vervorming, dat gebeurt ook in ons oor. Als een zuivere sinusvormige golf aan ons oor wordt toegevoerd, dan horen we die sinusgolf alleen tot op een zeker intensiteitsniveau als een zuivere toon. Wordt dit niveau overschreden, dan schijnt het geluid vervormd te zijn. Dat komt doordat subjectieve tonen in ons oor worden gevormd.

Wegel en Lane [11] voerden tonen van bekende frequenties en met regelbare en meetbare niveaus toe aan het oor en stelden vast bij welk niveau boven 10^{-16} W/cm^2 subjectieve harmonischen in het oor worden opgewekt. Hun bevindingen zijn in fig. 13 voorgesteld. De subjectieve ver-

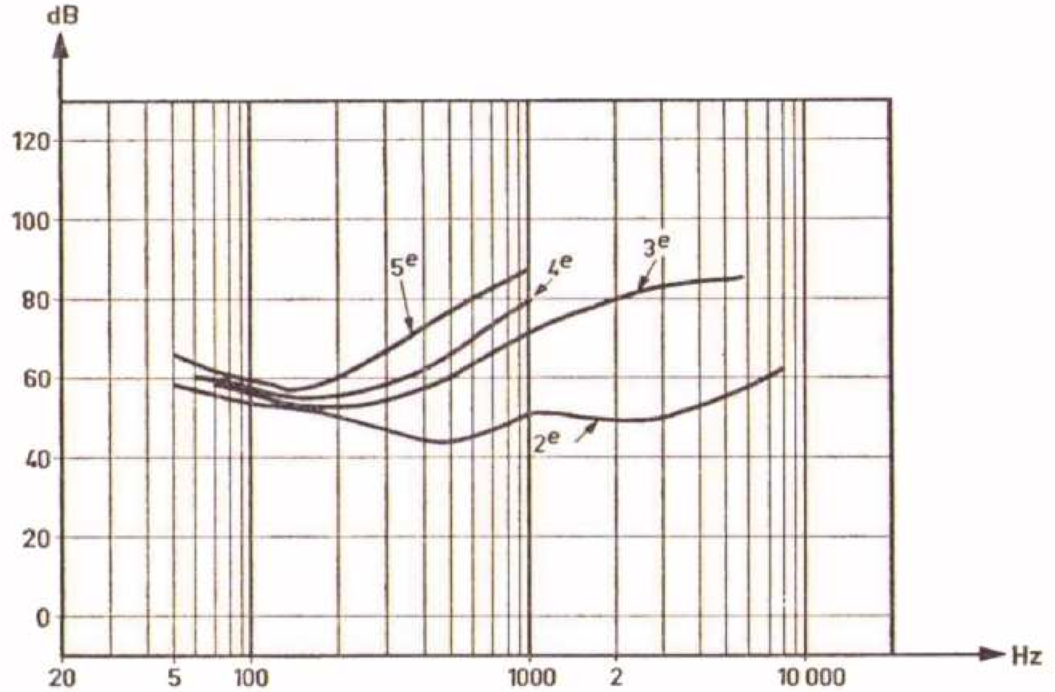


Fig. 13. De intensiteitsniveaus waarbij er in het oor bij verschillende frequenties harmonischen worden opgewekt.
De getallen bij de krommen geven de rangorde van de harmonischen aan.

vorming door de tweede harmonische begint bij een niveau van 50 dB en bij 80 dB zullen er 3e, 4e en 5e harmonischen over een groot deel van het frequentiegebied worden gevormd. Deze subjectieve vervorming begint dus op niveaus, die laag genoeg zijn om van praktisch belang te zijn. Hoewel het een vaststaande eigenschap van het menselijke horen is en het zelfs wel mogelijk kan zijn, dat een gedeelte van onze luidheidsindruk toe te schrijven is aan dit verschijnsel, is het zeer goed mogelijk, dat het daarbij optellen van vervorming, die ergens anders is ontstaan een schadelijke invloed heeft op onze esthetische waardering. Het lijkt waarschijnlijk, dat dit alleen het geval kan zijn als de vervorming die in de elektro-akoestische installaties ontstaat minstens van dezelfde grootte is als de subjectieve vervorming. Als de uitwendige vervorming veel zwakker zou zijn, zou deze door de subjectieve vervorming worden gemaskeerd.

Blijkbaar is de werkelijke intensiteit van de subjectieve tonen moeilijk te meten. De gewone gang van zaken is, dat behalve de zuivere toon, die

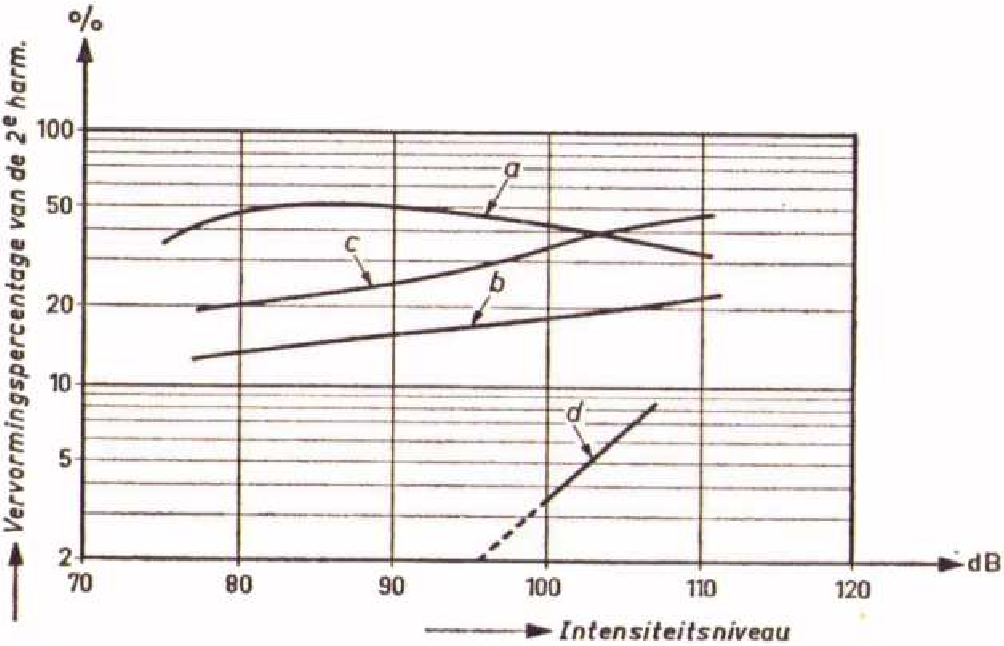


Fig. 14. Subjectieve vervorming door de tweede harmonische als functie van het intensiteitsniveau volgens:
a) von Békésy; *b*) Fletcher; *c*) Moe; *d*) Schouten.

de basis is van het onderzoek, ook harmonische tonen aan het oor worden toegevoerd. De metingen worden verricht door vast te stellen bij welk niveau van het harmonische signaal dit laatste in harmonie schijnt te zijn met de subjectieve harmonische, die in het oor wordt opgewekt. De bevindingen van vier onderzoekers zijn in fig. 14 [12] verzameld. De zeer

grote verschillen kunnen worden verklaard door de verschillende wijzen, waarop de verschillende onderzoekers de zaak hebben aangepakt, in zoverre, dat hun wijze van bepaling van het opheffen van de vervorming niet dezelfde waren. Alleen Schouten schonk volledig aandacht aan de fazeverhouding van de harmonische proeftonen. De resultaten van Schouten schijnen aan de lage kant te zijn. De overige onderzoekers vonden echter zulke hoge vervormingswaarden, dat men zich kan afvragen of men met een dergelijke grote vervorming, die in het oor ontstaat, de veel kleinere vervorming die in de installatie ontstaat, eigenlijk wel kan horen. Helaas zijn de resultaten van de metingen van Schouten alleen maar gepubliceerd voor intensiteitsniveaus van 100 dB en hoger. Hoewel zijn resultaten werkelijk te beperkt zijn om een betrouwbare extra-polatie voor lagere intensiteitsniveaus mogelijk te maken zien we, dat de verlengde lijn het 60 dB punt bereikt bij een vervorming van ongeveer 0,07 %. Dat wil zeggen dat daar de vervorming 63 dB lager ligt dan het niveau van de grondtrilling van 1000 Hz en dus onder de gehoordrempel (zie fig. 5). Zodra de proeftoon sterker is dan 60 dB zal de subjectieve toon hoorbaar worden. Dit komt min of meer overeen met de bevindingen van Wegel en Lane (zie fig. 13) en daarom lijkt het waarschijnlijk dat de lage waarden, die door Schouten werden gevonden, dicht bij de werkelijkheid liggen. We mogen dus de conclusie trekken, dat vervorming onhoorbaar zal zijn zolang zij niet meer bedraagt dan 3% bij 100 dB, tenminste in het weinig interessante geval van de reproduktie van zuivere sinusgolven.

De subjectieve vervorming kan een verschijnsel verklaren dat niet zo algemeen bekend is als wel zou moeten. Dat is, dat een vervormd signaal een luidere indruk maakt dan een onvervormd signaal van dezelfde intensiteit. Dus, als twee versterkers met gelijke weergavekarakteristieken om de beurt worden aangesloten op hetzelfde ingangssignaal en dezelfde luidspreker en de sterkteregelaars zijn zodanig ingesteld, dat een foonmeter in beide gevallen dezelfde aanwijzing geeft, dan zal de versterker met het grootste percentage vervorming de indruk geven luider te spelen. Dat wil dus zeggen, dat ons oor door de vervorming wordt verleid te geloven, dat het geluid luider is dan het werkelijk is. Wij stelden vast dat dit een handige manier is om twee installaties of versterkers, althans voor vervormingspercentages tussen 1% en 10% te vergelijken als geen beproevingsapparaten bij de hand zijn.

4-2. Maskeren van vervorming

Zoals reeds in de vorige paragraaf werd opgemerkt kan de gewenste toon de vervorming maskeren. Wanneer we een toon van een zekere intensiteit beluisteren en een tweede toon van dezelfde of een andere frequentie wordt voortgebracht, dan zal de eerste toon minder luid worden gehoord dan eerst. Om de eerste toon met dezelfde luidheid te horen als voor de maskerende toon werd voortgebracht, moet de intensiteit van de eerste worden vergroot. Wij moeten, om te kunnen worden verstaan, luider spreken als een straalvliegtuig overvliegt. Nu wordt de toename van de intensiteit, die nodig is om de oorspronkelijke luidheid te behouden, het maskeerniveau of de drempelverschuiving genoemd.

Zo zouden we bijvoorbeeld kunnen zeggen, dat het maskeerniveau van een straaljager voor spraak 40 dB is en van een vliegtuig met zuigermotor 30 dB.

Als we dat op vervorming toepassen zou dat het volgende betekenen: Wanneer alleen de vervorming wordt gereproduceerd en niet de onvervormde toon, dan zal de vervorming niet worden gehoord als haar niveau

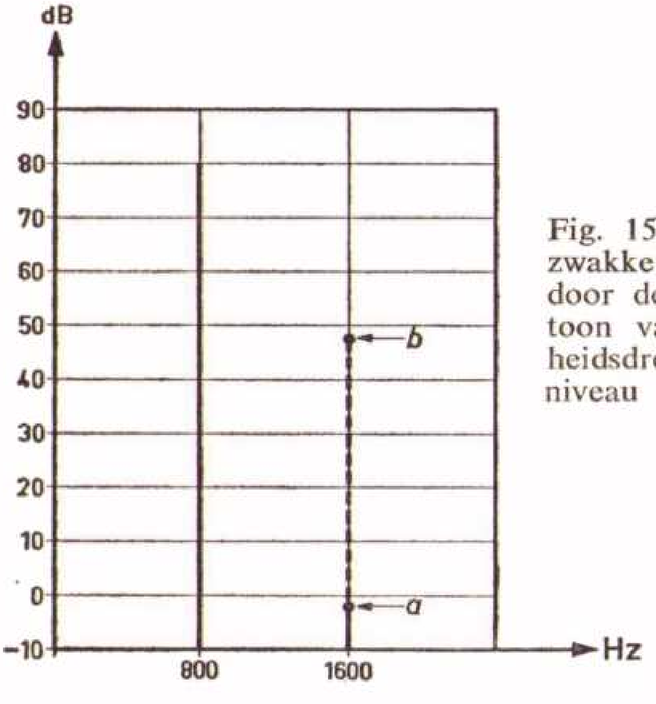


Fig. 15. De hoorbaarheidsdrempel voor een zwakke vervormingstoon van 1600 Hz wordt door de aanwezigheid van de oorspronkelijke toon van 800 Hz van de absolute hoorbaarheidsdrempel *a*) verschoven naar een hoger niveau *b*).

op de gehoordrempel ligt. Wordt dan ook nog de onvervormde toon gereproduceerd, dan zal de hoorbaarheidsdrempel verschuiven en de vervorming kan in intensiteit toenemen met het maskeerniveau en nog onhoorbaar blijven (zie fig. 15). Het verschil in niveau tussen de zuivere toon en

de vervormende toon is de toelaatbare vervorming. Deze is dus gelijk aan het niveau van de zuivere toon min het maskeerniveau.

Wegel en Lane [13] bepaalden de maskeerniveaus van zuivere sinus-

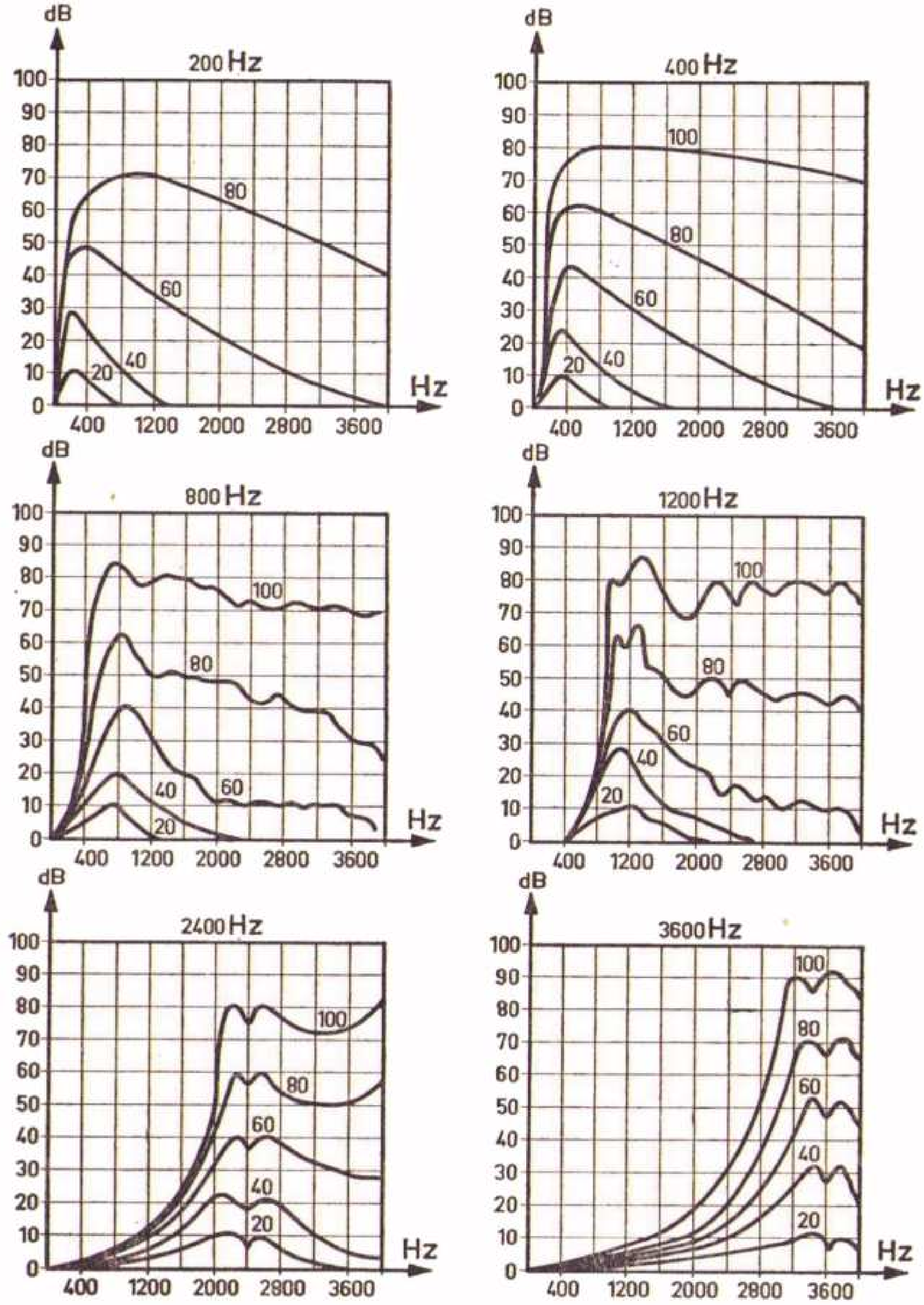


Fig. 16. Maskeereffect van tonen van *a)* 200 Hz, *b)* 400 Hz, *c)* 800 Hz, *d)* 1200 Hz, *e)* 2400 Hz en *f)* 3500 Hz ten opzichte van tonen van andere frequenties en verschillende intensiteiten.
Abscissen: frequentie van de gemaskeerde toon
ordinaten: maskeerniveaus of drempelverschuivingen
parameters: intensiteitsniveaus van het maskerende geluid.

vormige golven. De resultaten daarvan zijn opgenomen in fig. 16a tot d. De eerste van deze figuren laat de uitwerking zien van een toon van 200 Hz op het maskeren van tonen met andere frequenties. De intensiteit van de maskerende toon is bij iedere kromme aangegeven. De vertikale schaal geeft de drempelverschuiving of het maskeerniveau aan in dB, de horizontale verdeling geeft de frequentie aan van de gemaskeerde toon. Bijvoorbeeld: een toon van 200 Hz 60 dB zal de hoorbaarheidsdrempel van een toon van 2400 Hz 16 dB verhogen.

Wij zien uit deze figuren, dat het maskeereffect belangrijk is als de toon, die moet worden gemaskeerd een hogere frequentie heeft dan de maskerende toon. Dit is het geval als het om niet-lineaire vervorming van zuivere tonen gaat. Als het te maskeren signaal een lagere frequentie heeft dan de maskerende toon, dan is de drempelverschuiving aanmerkelijk minder. Dat kan gebeuren in het geval van intermodulatievervorming.

Teneinde een indruk te krijgen van de invloed van het maskeren op de

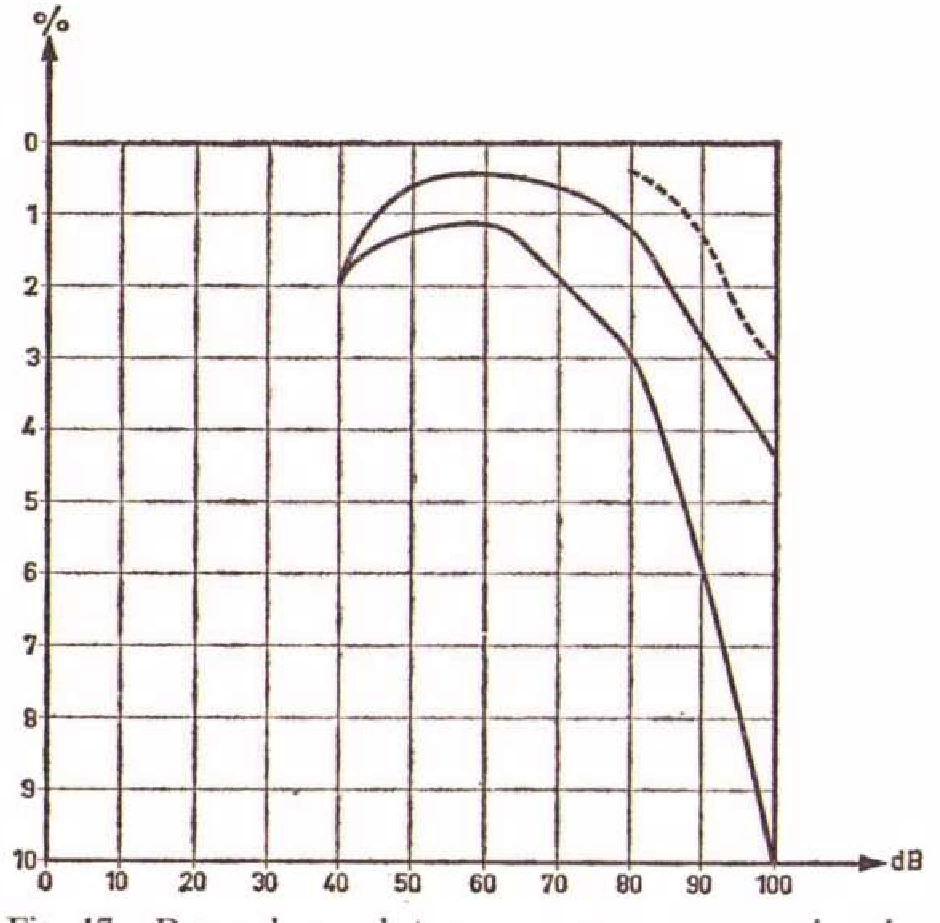


Fig. 17. Drempel voor het waarnemen van vervorming door de 2e en 3e harmonische (getrokken lijnen) en van de subjectieve vervorming (streeplijn) bij verschillende intensiteitsniveaus Frequentie 800 Hz.

waarneming van vervormingen hebben we uit fig. 16 berekend wat de toelaatbare vervorming door de tweede en derde harmonische zou zijn voor een zuivere sinusgolf van 800 Hz bij verschillende geluidsintensiteitsniveaus. De uitkomsten van deze berekeningen zijn verwerkt in fig. 17, waarin ook de geëxtrapoleerde subjectieve vervorming door de tweede harmonische is getekend.

Het valt direct op dat het maskeereffect de drempel voor het waarnemen van vervorming aanmerkelijk heeft verhoogd. De subjectieve vervorming is blijkbaar niet op dezelfde wijze van het maskeren afhankelijk.

Het is interessant vast te stellen, dat bij gemiddelde intensiteitsniveaus (60 dB) de eisen strenger zijn dan bij hoger niveaus. Bij de meeste installaties is de vervorming min of meer evenredig aan het uitgangsvermogen, maar het blijkt dat het een goede gewoonte is bij iedere installatie na te gaan of dat ook werkelijk het geval is. We kunnen hieruit zien, dat bij hogere niveaus, dat wil zeggen tussen 80 en 100 dB de totale vervorming $d_{2,3} = \sqrt{d_2^2 + d_3^2}$, die toelaatbaar is, in de orde ligt van 5 à 10%. Het is gewoonte voor een eenvoudige versterker of radio-ontvanger het uitgangsvermogen op te geven bij 5 of 10 % vervorming.

Als we deze berekeningen ook voor lagere frequenties zouden doorvoeren, dan zouden we zien, dat wat meer vervorming kan worden toegelaten, terwijl voor hogere frequenties juist het tegenovergestelde geldt.

De praktische waarde van proeven en berekeningen, die met een zuivere toon worden uitgevoerd is echter zeer beperkt, omdat zij geen juiste indruk geven van wat er gebeurt als een samengestelde muzikale klank wordt opgenomen en weergegeven. Het is een goede gewoonte in de techniek geworden om twee proefsignalen tegelijk toe te voeren en dan de interferentietonen te meten, die tengevolge van niet-lineaire vervorming ontstaan. In dit geval kan er onderscheid worden gemaakt tussen metingen, die gedaan zijn met twee tonen, waarvan de frequenties ver uit elkaar liggen of met twee tonen, waarvan de frequenties niet veel verschillen.

In het eerste geval, dat van de „groot interval" intermodulatievervorming is een van de frequenties meestal flink onder de 1000 Hz en de andere flink boven de 1000 Hz. De amplitude van het laagfrequentiesignaal wordt meestal zodanig gekozen, dat deze 4 maal die van het hoogfrequentiesignaal is (energieverhouding 16 : 1). De „kleine interval" intermodulatievervorming, meestal interferentievervorming genoemd, wordt minder dikwijls gemeten. Hier liggen beide proeffrequenties een heel eind boven

1000 Hz en meestal 1000 Hz van elkaar, waarbij beide signalen dezelfde amplitude hebben. Het is mogelijk de toelaatbare intermodulatievervorming te bepalen met behulp van de drempelverschuivingskrommen. In het geval van een 800 Hz + een 3500 Hz signaal zullen de intermodulatietonen frequenties hebben van 2700, 4300, 1900, 5100 Hz enzovoort.

We kiezen het geval waarbij de amplitude van het 800 Hz signaal viermaal die van het 3500 Hz signaal is. We vinden dan, dat als het gecombineerde geluid een intensiteitsniveau van 100 dB bereikt, er ongeveer 2% intermodulatievervorming kan worden toegelaten.

Tabel 7

800 + 3500 Hz — 4 : 1 — 100 dB
Intermodulatie produkten tengevolge van tweedemachts-vervorming:
2700 Hz wordt tot 2½% door 3500 Hz gemaskeerd
4300 Hz wordt tot 10% door 3500 Hz gemaskeerd
Intermodulatie produkten tengevolge van derdemachts-vervorming
1900 Hz wordt tot 7% door 800 Hz gemaskeerd
5100 Hz wordt tot 1,9% door 3500 Hz gemaskeerd
2400 + 3500 Hz — 1 : 1 — 100 dB
Intermodulatie produkten tengevolge van tweedemachts-vervorming:
1100 Hz wordt tot 0,1% door 2400 Hz en achtergrondbijgeluiden gemaskeerd
5900 Hz wordt tot 2,5% door 2400 + 3500 Hz gemaskeerd

Wij geven deze getallen onder enig voorbehoud omdat de frequenties, die we voor de berekening gebruikten dichter bij elkaar liggen dan normaal het geval is als intermodulatie wordt gemeten.

De laagste maskeerfrequentie waarvoor krommen beschikbaar waren was 800 Hz, maar door extrapolatie en vergelijking hebben we de toelaatbare grootte van de intermodulatie vastgesteld voor het geval van een 200 + 4000 Hz signaal en kwamen toen tot vergelijkbare resultaten.

Hieruit volgt, dat intermodulatievervorming (groot interval) niet meer mag bedragen dan 2%.

De toelaatbare intermodulatievervorming met klein interval, die ook interferentievervorming wordt genoemd, werd berekend voor het geval van twee even sterke signalen van 2400 en 3500 Hz. Hierbij zien we, dat de laagste interferentietoon slechts weinig wordt gemaskeerd, waaruit volgt dat interferentievervorming veel kritischer is.

In de meeste versterkers en in veel andere onderdelen van een elektroakoestische installatie, bestaat er een nauw verband tussen niet-lineaire vervorming, intermodulatie- en interferentievervorming (zie aanhangsel).

We vinden dat de intermodulatievervorming ongeveer viermaal de niet-lineaire vervorming is en de interferentievervorming ongeveer tweemaal het percentage van de niet-lineaire vervorming. Hieruit volgt, dat een installatie waarvan de niet-lineaire (enkele toon) vervorming 0,5% is, de intermodulatievervorming 2% en de interferentievervorming 1% zal zijn. Dan zal alleen de interferentietoon worden gehoord.

4-3. Toelaatbare vervorming van muzikale klanken

Tot nu toe hebben we alleen kunstmatige proefsignalen beschouwd. Het muzikale signaal is volkomen anders. Er bestaat een nauw verband tussen de frequenties van de grondtonen en de boventonen.

Een toon van 800 Hz zal bestaan uit een grondtoon van 800 Hz en de harmonischen 1600, 2400, 3200 Hz enz. Dit heeft een zekere invloed op de hoorbaarheid van de vervorming.

Tabel 8

Rangnummer harmonische frequentie in Hz amplitude in dB	1e 800 100	2e 1600 94	3e 2400 88	4e 3200 82	4000	4800	5600	6400	7200
2e harmonische vervorming in dB		60		54		48		42	
3e harmonische vervorming in dB			54			48			42
intermodulatie 2e in dB	68 60 54	71 65	71 68	71	62	65	56		
intermodulatie 3e in dB	71	68	65	69	71	65	63	65	
totale vervorming in dB	73	73	73	73	71	68	64	65	
boven gehoorgrens in dB	—	—	—	0	2	3	4	?	

We hebben de hoorbaarheid van de vervorming berekend van een klank, samengesteld uit een grondtoon van 800 Hz op een niveau van 100 dB, een tweede harmonische (1600 Hz) op 94 dB, een derde harmonische (2400 Hz) op 88 dB en een vierde harmonische (3200 Hz) op 82 dB. Het totale niveau is 104 dB. We hebben aangenomen, dat er 1% vervorming

optrad door de 2e harmonische en 0,5% door de derde harmonische, zodat er een totale vervorming was van 1,1%. De overeenkomstige grootten van de intermodulatievervorming werden berekend met behulp van de formule, die in het aanhangsel is gegeven. In tabel 8 zijn de niveaus te vinden van de verschillende vervormingsprodukten.

Aannemende, dat alle vervormingen van dezelfde frequentie in faze zijn, zijn ze bij elkaar opgeteld en de daaruit volgende niveaus werden vergeleken met de maskeerkrommen om na te gaan of de tonen hoorbaar zouden zijn. Voor de frequenties boven 4000 Hz is dat voor zover mogelijk gedaan door extrapolatie. De conclusie is, dat alleen de vervormingsprodukten met frequenties boven de hoogste harmonische hoorbaar zullen zijn. Wanneer de vervormingen met een factor 2 (6 dB) worden verminderd, dan zullen deze laatsten ook onhoorbaar worden. Dat wil zeggen dat de vervorming door de tweede harmonische d_2 ongeveer 0,5% zou moeten zijn, terwijl de vervorming door de derde harmonische d_3 in ons voorbeeld niet boven 0,25% mag uitkomen.

Hieruit volgt $d_{2,3} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}25^2} = 0{,}56\%$

De maskeerkrommen zijn niet uitvoerig genoeg om dit voorbeeld met grotere nauwkeurigheid uit te voeren, vooral voor wat betreft de vervormingscomponenten van hoge frequentie.

Bovendien is onze veronderstelling dat $d_3 = 0{,}5\ d_2$ niet altijd juist, hoewel het in de praktijk wel dikwijls zal opgaan. We hebben de hogere harmonischen verwaarloosd, wat in de meeste gevallen ook is toegestaan.

We kunnen echter de interessante conclusie trekken, dat klanken met veel harmonischen minder worden beïnvloed door vervorming dan klanken van een eenvoudiger samenstelling. Voor klanken met weinig harmonischen is de toelaatbare vervorming ongeveer dezelfde als die welke gevonden wordt voor het intermodulatie proefsignaal. Worden klanken met veel harmonischen gereproduceerd, dan mag de vervorming ongeveer twee maal zo groot zijn.

De intermodulatieproef heeft dus praktische betekenis voor het geval van een enkele muzikale toon.

Het volgende geval, dat moet worden onderzocht, is dat van twee samengestelde klanken met verschillende grondtonen. We kiezen het geval, dat de frequenties van de grondtonen een frequentieverhouding hebben van 3 : 2 en iedere klank drie harmonischen heeft. Wij hebben de vervormingsprodukten berekend veroorzaakt door de vervorming tengevolge van de 2e en 3e harmonische van een combinatie van een toon van 800 Hz en

een even sterke toon van 1200 Hz. Het grootste deel van de vervormingen zal op dezelfde wijze als in ons vorige voorbeeld worden gemaskeerd, maar we zien, dat er een interferentietoon van 400 Hz zal ontstaan, die slechts 30 dB zwakker is dan de grondtonen. Vergelijking met fig. 16c laat zien, dat om dit geluid door de grondtoon van 800 Hz te laten maskeren, het ca. 50 dB beneden het niveau van die toon moet liggen. Hieruit volgt, dat de vervorming met 20 dB moet worden verzwakt om onhoorbaar te worden, dat is dus met een factor 10. Daarom mag de vervorming niet groter zijn dan 1,1 : 10 = 0,11 %. Dit is een vrij lage waarde. Daarom heeft het onderzoek naar de vervorming door interferentie praktische betekenis in het geval dat muzikale accoorden moeten worden gereproduceerd. De proeven van Wegel en Lane werden genomen met zuivere sinusvormige golven en het is niet onmogelijk, dat de samengestelde geluiden, zoals die hier worden beschouwd een sterkere maskerende werking hebben op lage tonen dan uit de grafieken zou volgen. Helaas zijn er slechts weinig gegevens beschikbaar over de maskerende werking van andere samengestelde geluiden dan de bijgeluiden van machines.

Hetzelfde kan worden gezegd over de invloed van de subjectieve vervorming, die optreedt binnen ons gehoorsysteem, op de hoorbaarheid van de vervorming. Deze subjectieve vervorming geeft ook nog aanleiding tot intermodulatie effecten. Het is dan zeer goed mogelijk, dat de subjectieve interferentievervorming kleinere hoeveelheden interferentievervorming, die in het waargenomen signaal voorkomen, maskeert. Hieruit volgt, dat het waarschijnlijk lijkt dat zelfs bij meer dan 0,1% vervorming de 400 Hz interferentietoon uit ons voorbeeld niet zal worden gehoord. Verder zullen verschillende interferentietonen, die door de muziek niet worden gemaskeerd, een zodanig lage frequentie hebben, dat zij binnen het frequentiegebied vallen waar de omgevingsbijgeluiden in verhouding luid zijn. Bij deze lage frequenties kunnen de bijgeluiden de interferentievervorming maskeren tot op ongeveer 2 × 0,04% = 0,08% of meer.

Ook is er in dit voorbeeld, en dat geldt voor alle harmoniërende combinaties van muzikale klanken, een harmonisch verband tussen de interferentietoon en de twee tonen, die worden voortgebracht en dit zal het ergernis gevende effect verminderen. Wij geloven daarom, dat een hogere waarde, van zo omstreeks 0,4%, toe te laten is.

4-4. Proefondervindelijk bewijs

Wij hebben getracht met behulp van luisterproeven uit te maken hoeveel vervorming bij de reproduktie van muziek kan worden toegelaten voor dat zij hoorbaar wordt. Olson [14] gebruikte een high fidelity geluidsreproduktiesysteem waarvan de totale weergavekarakteristiek van microfoon, versterker en luidspreker van 40 - 15000 Hz vlak was binnen ± 2 dB en de totale vervorming minder dan 0,25%. Het weergaveniveau was ongeveer 70 dB. Spraak en muziek van een orkestje van zes man werden gereproduceerd. Aan het origineel konden vervormingen worden toegevoegd die voornamelijk bestonden uit 2e en 3e harmonischen op de niveaus, waarvoor wij ons interesseren. Gevonden werd, dat 0,7% totale vervorming juist hoorbaar was als muziek werd weergegeven en 0,9% bij spraak. Als de frequenties boven 4000 Hz werden afgesneden, dan werden deze grenzen verschoven naar 1,1% respectievelijk 1,6%. Dit komt behoorlijk overeen met de hierboven afgeleide waarden.

Een andere proef werd genomen door Alons en Slot. Hierbij konden drie verschillende versterkers met een vervormingspercentage van 0,5% bij een vermogen van respectievelijk 10, 20 en 40 watt om de beurt worden aangesloten op een laboratoriummicrofoon en een batterij luidsprekers. De

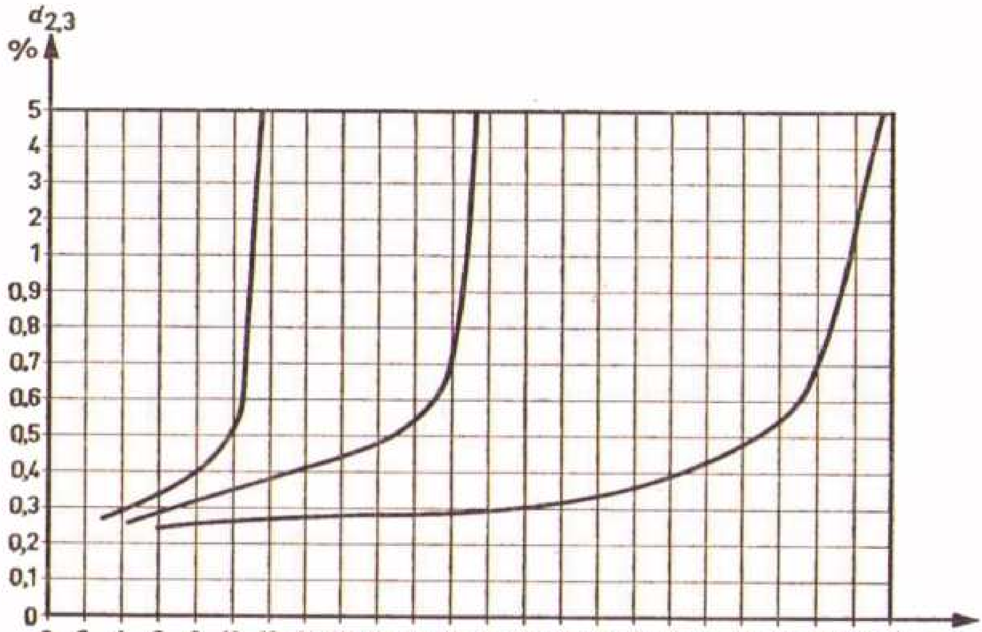


Fig. 18. Totale harmonische vervorming ten opzichte van het uitgangsvermogen van drie versterkers, die in een vervorming-waarnemingsproef werden gebruikt.

weergavekarakteristieken van de drie versterkers waren binnen ± 1 dB gelijk, en de uitgangsvermogens ook binnen 1 dB, zoals bij het overschakelen van de ene op de andere versterker de geluidssterkte niet hoorbaar veranderde.

De totale weergavekarakteristiek was van 30-16.000 Hz vlak binnen ± 1 dB en de afname bij 20.000 Hz was ongeveer 6 dB. Het uitgangsvermogen van geen van de versterkers kwam ooit boven de 10 W uit. De vervormingskrommen van de drie versterkers zijn in fig. 18 getekend. De muziek werd gespeeld door een dansorkestje van 5 man.

Een uitgezochte groep proefpersonen werkte aan de proef mee en het bleek, dat enkelen daarvan tijdens een A/B/C proef toch verschil konden horen tussen de drie versterkers. Dat wil zeggen, zij konden vertellen welke van de drie versterkers de minste vervorming gaf. Het was moeilijker te kiezen tussen de 20 en de 40 watt versterker dan tussen de 10 en de 20 W versterker. Hieruit volgt, dat de gemiddelde kritische en geoefende luisteraar geen onderscheid kan maken tussen 0,5% vervorming en minder, een kritischer geoefende luisteraar kan geen onderscheid horen tussen 0,4% en minder en slechts de uitzonderlijk kritische audio vakman is in staat een vervorming van slechts 0,3% te constateren. Dit komt behoorlijk overeen met de waarden, die wij in de vorige paragrafen hebben afgeleid.

Hieruit volgt, dat de volgende vervormingspercentages niet kunnen worden gehoord, zelfs niet door kritische luisteraars in een zeer stille omgeving.

Enkele tonen met in vergelijking weinig harmonischen, zoals b.v. een fluit	0,6%
enkele tonen met veel harmonischen	1,1%
accoorden	0,3%

In de meeste gevallen en voor de meeste luisteraars zal iets meer vervorming toelaatbaar zijn. Wanneer ergens in de installatie hogere harmonischen (4e of hoger) worden opgewekt, gaat het eenvoudige verband tussen niet-lineaire vervorming en intermodulatievervorming, dat we gebruikten voor het vaststellen van enkele waarden, niet langer op, maar over het algemeen zullen goede installaties uiterst weinig vervorming door hogere harmonischen hebben.

Alvorens dit hoofdstuk te besluiten willen we er op wijzen, dat overbelasting van een of ander gedeelte van de elektro-akoestische installatie

niet altijd kan worden voorkomen. Zelfs al worden absolute topwaarden beschouwd, dan is het mogelijk dat deze zo nu en dan of herhaaldelijk worden overschreden omdat met correcties in de weergavekarakteristiek niet volledig rekening werd gehouden bij het vaststellen van het toelaatbare vermogen of de toelaatbare spanning.
Storingen, die in de installatie kunnen doordringen, nl. via de netaansluiting of die worden veroorzaakt door kleine onvolkomenheden in de grammofoonplaat of de band, kunnen ook een overbelasting van de versterkers of andere onderdelen veroorzaken en daardoor aanleiding zijn tot een tijdelijke toeneming van de vervorming boven het toelaatbare maximum.

Vooropgesteld dat zij voldoende kort duren zullen zelfs in verhouding grote vervormingen niet worden gehoord. Het duurt gemiddeld minstens 30 milliseconden voor de frequentie van een toon kan worden herkend. Vervorming, die korter duurt zal veel minder opvallend zijn dan normaal, dank zij deze „traagheid in de waarneming".

Het is echter mogelijk, dat een korte overbelasting de versterker zodanig „van streek maakt" dat hij gedurende een aanmerkelijk langere tijd een vervormd signaal blijft afgeven.

Dit kan door verschillende redenen worden veroorzaakt, zoals het optreden van roosterstroom, waardoor de negatieve voorspanning van de versterkbuizen verandert of ook een tijdelijke verandering in de inductantie van de uitgangstransformator, die de tegenkoppeling in de war stuurt.

Amplitudebegrenzing in een van de trappen zal de uitgangsspanning begrenzen en daardoor ook de tegenkoppelingsspanning, wat tot overbelasting leidt van de voor- en tussenversterkers enz. Het is moeilijk de overbelastingseisen te specificeren. Een versterker met een veiligheidsmarge van, laten we zeggen 3 of 6 dB, zal in vele gevallen een veilige voorziening zijn, maar we moeten wel bedenken, dat een dergelijke versterker duurder is en dat bij het normale niveau waarop wordt gewerkt, brom en ruis sterker zullen zijn. Zelfs dan kan er soms nog overbelasting optreden als de bassen of hoge tonen worden opgehaald.

De beste eis is, dat de versterker volkomen stabiel blijft zelfs als hij sterk overbelast is. Dan zal de vervorming niet langer duren dan de overbelasting.

Geluiden, voortgebracht door slaginstrumenten kunnen meer moeilijkheden opleveren dan andere geluiden, zodat dit punt van buitengewoon belang is voor de reproduktie van symfonische muziek; voor jazzmuziek

met haar veel geringere dynamiek en ook voor solo-instrumenten is de situatie minder kritisch.

We hebben geconstateerd, dat wanneer geen gespecialiseerde laboratoriuminrichting ter beschikking staat de beste methode van beproeving is een vergelijkende luisterproef bij hoge geluidsniveaus en met muziek met grote en snelle contrasten in geluidssterkte.

HOOFDSTUK V

WEERGAVEKARAKTERISTIEK

5-1. Over gewoonten

Het menselijke oor kan met grote nauwkeurigheid de ene van de andere frequentie onderscheiden en het bestrijkt een zeer groot frequentiegebied. Evenals het oog zal het reageren op signalen, die een amplitude hebben, die een miljoen maal kleiner is dan van signalen, die een pijnindruk geven. Maar, en dat is niet zoals bij het oog, het reageert ook op frequenties, die een factor 1000 uit elkaar liggen - de verhouding tussen de langste en de kortste zichtbare golflengte echter is slechts 1 : 2.

Het kan zijn, dat dit verklaart waarom grote lineaire vervormingen en daardoor vervormingen in de frequentiekarakteristiek kunnen worden toegelaten alvorens de verstaanbaarheid van akoestische informaties ernstig wordt benadeeld. Dit is niet verwonderlijk in het geval van zien, omdat het oog in eerste instantie reageert op licht zonder rekening te houden met de kleur. Een dagelijks voorbeeld van frequentievervorming is de telefoon, die een weergavegebied heeft van slechts 500 tot 2000 Hz en zelfs nog wel minder, hoewel het frequentiespectrum van de menselijke stem loopt van 80 tot boven de 8000 Hz. Het zou niet juist zijn te beweren, dat dus blijkbaar het grote weergavegebied van het oor overbodig is, maar het is een feit, dat mensen zodanig gewend kunnen raken aan lineaire vervorming, dat zij vervormd geluid verkiezen boven onvervormd geluid.

Volgens een door Kirk in 1956 voor de International Acoustical Conference gehouden voordracht is het mogelijk mensen een voorkeur op te dringen voor reproduktie over een breed frequentiegebied of over een smal frequentiegebied. Twee groepen proefpersonen luisterden twee uur per week gedurende 13 weken naar muziek, welke voor de ene groep werd gereproduceerd met een frequentiegebied van 30 tot 15.000 Hz en voor de andere groep met een frequentiegebied van 180 tot 3000 Hz. Na deze proef toonden de leden van iedere groep over het algemeen meer voorkeur voor het frequentiegebied waaraan ze gewend waren dan voor het andere. We kennen allemaal mensen, die zodanig gewend zijn geraakt aan weergave met „boem" in de lage frequenties of overdreven hoge tonen,

dat zij weigeren naar natuurlijker geluid te luisteren. Door dit feit kunnen we ons afvragen of er wel enige reden is om ons druk te maken over de weergavekarakteristiek. Er kunnen enkele argumenten worden aangevoerd voor een redelijk goede weergave. Het is vermoeiend te luisteren zowel naar dreunende als naar schrille muziek. Weergave met een beperkt frequentiegebied vraagt niet veel aandacht, we kunnen gemakkelijk lezen als de radio aanstaat met de hoge tonen regelaar op minimum gedraaid, maar de muziek is dan zo „verwaterd" dat iets of veel van haar schoonheid verloren is gegaan. Er is echter een zekere ontroering in de schoonheid van het geluid. Iedereen zal toegeven, dat er goede en slechte piano's en goede en slechte violen zijn. Als de weergavekarakteristiek van een elektro-akoestische installatie niet goed is, zal de slechte viool, zonder meer als een viool klinken en de goede eveneens. Dat wil zeggen, dat al het geld, dat voor een Stradivarius werd betaald, verspild is. Dat dit laatste niet het geval is zal iedereen zich realiseren, die van vioolmuziek houdt en ooit het genoegen heeft gehad in werkelijkheid naar een Stradivarius te luisteren. En zo zal eveneens iemand, die naar een piano luistert de voorkeur geven aan de fraaie klank van een concertvleugel of zelfs een kleine vleugel van bekend fabrikaat, boven de klank van zo maar een normale of mini-piano van een onbekend merk.

Voor een luisteraar met onderscheidingsvermogen is de weergavekarakteristiek van een audio-installatie belangrijk. Van een telefoon verwachten we alleen maar informaties te krijgen, maar we verlangen meer dan dat van een grammofoon.

5-2. De onderste grens van het frequentiegebied

De belangrijkste factoren zijn de hoogste en de laagste frequentie, die moeten kunnen worden weergegeven, een rechte weergavekarakteristiek en de toe te stane afwijkingen daarvan ten opzichte van de horizontale lijn en de verdeling van het akoestische vermogen over het betreffende frequentiegebied. De grondfrequenties van de klanken, die door onze muziekinstrumenten worden geproduceerd lopen van 16 tot 4186 Hz. De laagste grondfrequenties van een aantal van deze instrumenten zijn aangegeven in tabel 9.

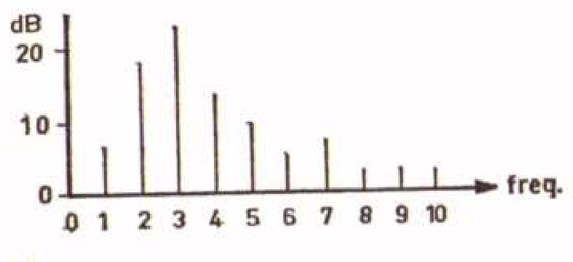
De conclusie, die uit deze tabel kan worden getrokken zou kunnen zijn, dat opname en weergave naar beneden tot bij 16 Hz nodig zijn. Dat zou

Tabel 9

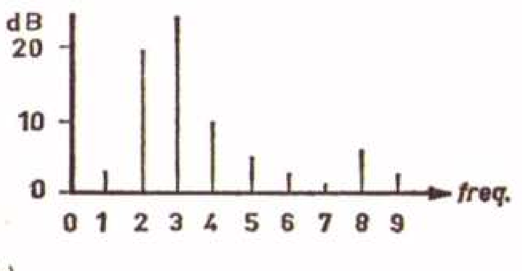
	Hz
orgel	16,351
piano	27,5
contrafagot	30,868
harp	32,703
pijporgel	36,708
contrabas	41,203
tuba	43,654
klokkenspel	48,999
bas saxofoon	51,913
bas trombone	55
waldhoorn	61,7
cello	65,14
grote trommel	87,307
bas (zanger)	87,3
clarinet	110
trompet	146
viool	196

grote moeilijkheden veroorzaken wanneer we alleen maar denken aan de grote luidsprekerkasten, die nodig zijn voor de weergave van tonen van 16 Hz. Er zijn echter enkele feiten, die het mogelijk maken minder strenge eisen te stellen.

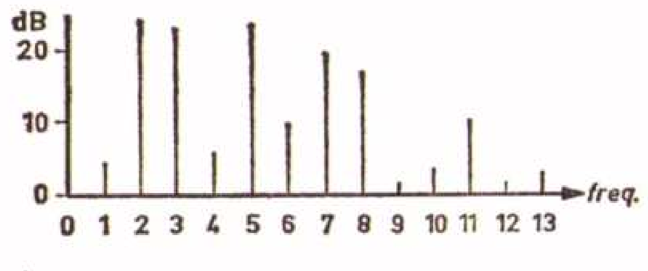
Het eerste is, dat over het algemeen de grondtonen van zeer lage klanken aanmerkelijk zwakker zijn dan de tweede en derde harmonische. Dit is weergegeven in fig. 19 a, waarin het geluidsspectrum van de laagste toon van een contrabas (41 Hz) is getekend.



a)



b)



c)

Fig. 19. Spectra van de laagste tonen van enkele instrumenten en van de menselijke stem.
a) contrabas
b) vocale *a* (zoals in raad)
c) g-snaar van de viool

Wanneer de derde harmonische een sterkte heeft van 85 dB, dan zal de grondtoon 70 dB zijn. De luidheidsniveaus van de tweede harmonische en de grondtoon zijn dus volgens fig. 5 respectievelijk 81 en 23 foon. Behalve wanneer het heel stil is in de kamer zal de grondtoon niet kunnen worden gehoord. Soortgelijke voorbeelden zouden kunnen worden gegeven voor de zeven of acht laagste instrumenten. Dit wordt verder verduidelijkt door de geluidsspectra, die getekend zijn in fig. 19 b en c voor de gesproken A (als in raad) en de losse G-snaar van de viool.

Wanneer een geluid niet kan worden gehoord is het ook niet nodig het te reproduceren. Dat kan vreemd schijnen, omdat we kunnen verwachten dat als de grondtoon van een klank wordt onderdrukt, de hoogte zal worden bepaald door de tweede harmonische en daardoor een octaaf hoger zal worden gehoord dan hij werkelijk is.

Schouten [16] toonde aan, dat de hoogte van een toon met veel harmonischen niet verandert wanneer op de een of andere wijze de grondtoon wordt onderdrukt. Dit verschijnsel kan niet worden verklaard uit de subjectieve intermodulatievervorming in het oor, want het treedt ook op bij lage niveaus, waarbij deze vervorming te verwaarlozen klein is. Blijkbaar is het de periodiciteit van de samengestelde trilling, die gevormd wordt door de deeltonen, die ons de indruk van de hoogte geeft en niet de aanwezigheid van de grondtoon. Dus de frequenties 400, 600, 800 Hz. enz. zullen tezamen de indruk geven van een toonhoogte van 200 Hz. De hoogte wordt bepaald door het residue, dat is wat is overgebleven van de samengestelde klank als de grondtoon en enkele lagere harmonischen worden onderdrukt. Kort geleden meldde Harris [17] dat dit verschijnsel, het bepalen van de toonhoogte uit de periodiciteit van de rest, mogelijk is tot aan 500 Hz. toe. Onderdrukking van b.v. een grondtoon van 400 Hz zal dus de toonhoogte niet veranderen maar het timbre zal natuurlijk wel worden beïnvloed. Daarom hangt de hoogte van een lage toon niet af van

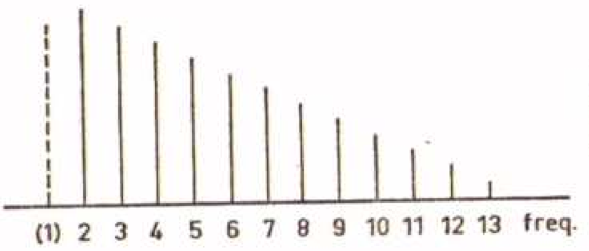


Fig. 20. Van een klank met voldoende boventonen zal de toonhoogte gelijk zijn aan die van de grondtoon, zelfs als deze ontbreekt.

de aanwezigheid van de grondtoon (fig. 20). Dat is heel prettig, want anders zou de hoogte van een lage toon van de contrabas afhangen van de

luidheid waarmee wordt gespeeld. De grondtoon heeft zekere invloeden op het timbre, maar bovenstaand voorbeeld toont al aan, dat deze invloed, als het om lage tonen gaat, maar zeer beperkt is, behalve voor zeer luide klanken.

In dit verband is het interessant op te merken, dat in grote kerkklokken de grondtonen ook zeer zwak zijn in vergelijking tot de boventonen en toch wordt de indruk gevestigd, dat er een sterke grondtoon aanwezig is. Dit verklaart, tussen twee haakjes, waarom opnamen van kerkklokken zeer goed kunnen klinken, zelfs wanneer ze worden weergegeven door een installatie waarvan de lage tonen weergave verre van goed is. Een ander voorbeeld van dit verschijnsel is, dat bij telefoongesprekken de toonhoogte van de stemmen niet verandert hoewel de grondtonen en verschillende van de lagere harmonischen niet worden weergegeven. De laagste tonen op de registers van het orgel en de piano worden niet veel gebruikt. Niet ieder orgel heeft een 64-voet pijp en zelfs als deze er is mag zij toch niet altijd worden gebruikt omdat deze trillingen met een zeer lage frequentie een groot gevaar kunnen opleveren voor de kostbare gebrandschilderde ramen. De A_0 toets van de piano zal alleen op de allerbeste instrumenten zuiver klinken.

Hieruit volgt, dat als de lage tonen weergave van een elektro-akoestische installatie niet beneden de 40 Hz komt, de invloed daarvan op de kwaliteit van de weergave alleen maar in een heel enkel en speciaal geval merkbaar zal zijn.

Hierbij wordt vooropgesteld, dat geen resonanties optreden vlak bij de afsnijfrequentie en dat de vervorming zwak blijft naar beneden tot op z'n minst een octaaf lager dan die frequentie.

5-3. De bovengrens van het frequentiegebied

Wanneer als grens voor de hoge tonen weergave geldt de hoogste toon, die men ooit op de toonschaal tegenkomt, nl. voor de piccolo en die een grondfrequentie heeft van 4.186 Hz zou geen enkele noot worden gemist, maar omdat er vele deeltonen worden onderdrukt zou de klank sterk te lijden hebben. In tabel 10 zijn de hoogste frequenties opgenomen die door verschillende muziekinstrumenten worden voortgebracht.

In tegenstelling tot wat gezegd is over de grondtonen met lage frequenties en in tegenstelling tot wat men te dikwijls denkt, kunnen deze hoge

Tabel 10

	Hz
grote trommel	7000
bombardon	8000
zangstemmen	9400
harp	11000
orgel	13000
xylofoon	13000
saxofoon	14000
cello	16000
viool	16000
bekkens	18000

frequenties van een behoorlijke sterkte zijn. De deeltoon van 18000 Hz van een bekken is van dezelfde sterkte als de grondtoon van 680 Hz en slechts 8 dB zwakker dan de deeltonen tussen 1000 en 2000 Hz. De krommen van Fletcher-Munson tonen aan, dat bij 14000 Hz het oor gevoeliger is voor tonen met een intensiteit van b.v. 50 dB dan bij 40 Hz en daarom moeten volgens deze krommen de hoogste boventonen zonder enige beperking worden weergegeven. Voor zover het hoge frequenties betreft geven deze krommen geen zuiver beeld omdat de mogelijkheid hoge frequenties te horen afneemt met de leeftijd van de luisteraar. Baby's horen frequenties tot 20000 Hz, op 20 jarige leeftijd zal de bovenste waarnemingsgrens gemiddeld liggen bij 16000 Hz, bij 40 jaar is de grens ongeveer 14000 Hz en met 60 jaar kunnen frequenties boven de 10000 Hz niet meer worden gehoord. Er wordt wel gezegd dat, daar high fidelity installaties meestal te duur zijn voor jonge mensen en oudere mensen de hoge frequenties toch niet kunnen horen, het ook niet nodig is zich druk te maken over de weergave van de allerhoogste frequenties door dergelijke installaties.

Wij waren tegenwoordig bij een proef op twee geleerden, waarvan de ene absoluut doof was voor frequenties boven 10000 Hz en de ander boven 11000 Hz. Aangezien zij beiden nog steeds op akoestisch gebied werkzaam zijn zullen wij hun namen niet onthullen. Beiden konden feilloos aangeven wanneer een filter in de versterker werd ingeschakeld dat de hoogste weergavegrens terugbracht van 18000 Hz tot 12000 Hz. Deze personen konden niet werkelijk aangeven wat er gebeurde, maar zij stelden onafhankelijk van elkaar vast, dat de muziek niet zo goed klonk als de schakelaar in een aangegeven stand werd geplaatst (afsnijden hoge frequenties).

Het kan zijn, dat de hoogste frequenties, zelfs al worden ze niet werke-

lijk gehoord, toch aanleiding geven tot intermodulatie in ons gehoorzintuig en dat de afwezigheid van deze subjectieve intermodulatietonen als onnatuurlijk wordt beschouwd. Het is mogelijk, dat ook nog andere verschijnselen hierbij een rol spelen.

Het is soms nodig om de hoogste frequenties te onderdrukken. Dit kan bijvoorbeeld wenselijk zijn bij kleine draagbare radio-ontvangers en het was destijds (1945) nodig, toen het mogelijk was groeftasters te vervaardigen, die een uitgesproken betere weergavekarateristiek hadden dan de toen verkrijgbare grammofoonplaten. Het bleek, dat wat er boven de 4000 Hz op verschillende platen aanwezig was hoofdzakelijk bestond uit vervorming en naaldgeruis. Het onderdrukken van de hoge frequenties was toen wenselijk, althans bij groeftasters voor algemeen gebruik. In principe stond de keus vrij tussen *a)* dempen, *b)* afsnijden en *c)* scherp afsnijden, zoals in fig. 21 is getekend. Het bleek, dat kromme *a)* ver-

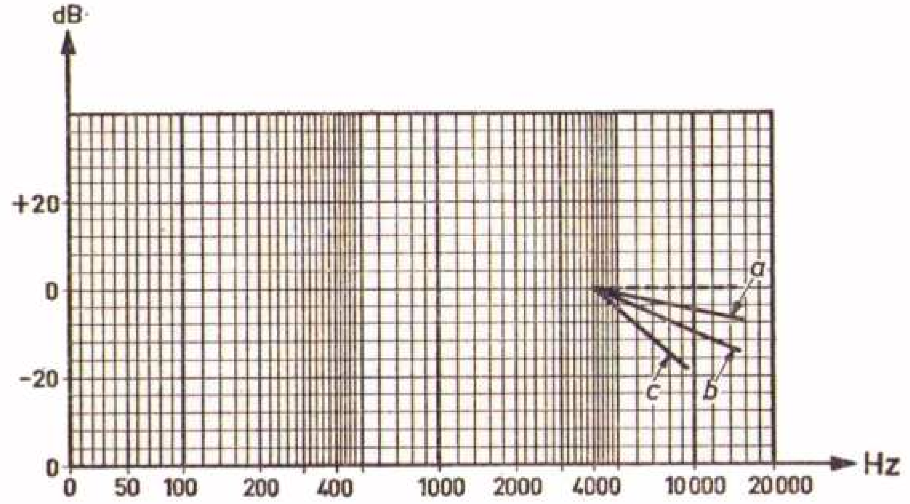


Fig. 21. Drie weergavekrommen van groeftasters:
streeplijn — recht
a) afname 4 dB per octaaf
b) afsnijden 8 dB per octaaf
c) scherp afsnijden 16 dB per octaaf.

geleken met de rechte weergavekarakteristiek slechts weinig resultaat opleverde voor het onderdrukken van ongewenste bijgeluiden.

Bij goede grammofoonplaten kon echter wel de mindere weergave van de hoge frequenties worden geconstateerd. Het geluid was iets te dof. Kromme *c)* daarentegen onderdrukte zeer effectief vervorming en bijgeluiden, die door de plaat werden veroorzaakt, maar had het onverwachte gevolg, dat de muziek scherp klonk. Kromme *b)* was een com-

promis, dat een goede onderdrukking van de bijgeluiden opleverde en tevens een behoorlijk heldere weergave, feitelijk nog helderder dan met groeftasters met de kromme *a)*. Het resultaat was voldoende opvallend voor de doorsnee luisteraar om zich te vergissen en te geloven dat groeftasters met karakteristiek *b)* meer hoge tonen weergaven dan groeftasters met een rechte weergavekarakteristiek. Het verschijnsel dat de weergave helderder of scherper klinkt dan bij een rechte karakteristiek begint als de verzwakking meer is dan 6 dB per octaaf.

Helaas kennen we geen volledige verklaring van dit verschijnsel en ook geen juiste kwantitatieve analyse. Ten dele kan het misschien worden verklaard door aan te nemen dat het afsnijden van een belangrijk deel van het residu tot op zekere hoogte onze zekerheid over de hoogte van een toon zal verminderen, vooral wanneer de grondtoon niet erg sterk is. Een andere verklaring kan zijn, dat een scherp afsnijden van de weergavekarakteristiek van een groeftaster, versterker of luidspreker tengevolge heeft, dat dat deel van het oor, dat reageert op de afsnijfrequentie abnormaal zal reageren op het verminkte signaal [18].

Het basilair membraan is niet selectief, omdat ieder punt daarop reageert op een frequentiegebied van ongeveer een octaaf. Het ontbreken van een gedeelte van het signaal zal dus op een groot oppervlak van het membraan invloed uitoefenen. Het gevolg daarvan is, dat de automatische sterkteregeling van het oor niet goed meer zal werken omdat een gedeelte van het signaal waaruit de automatische sterkteregeling wordt betrokken, er niet is.

Hoe de verklaring ook mag zijn, in ieder geval heeft men geconstateerd, dat de weergave van een elektro-akoestisch systeem boven de hoogste frequentie, die moet worden weergegeven, niet meer dan 6 dB per octaaf mag afvallen wanneer een scherper worden van de klank moet worden voorkomen. Dit gaat ook op wanneer voor de bovenste grens van een rechte weergavekarakteristiek een frequentie van wel 16000 Hz wordt gekozen.

In dit verband wordt er op gewezen, dat er bij reproduktie altijd een zwak stoorsignaal aanwezig zal zijn. Het „kleuren" van het geluid door scherp afsnijden van de weergavekarakteristiek treedt niet alleen op bij de gewenste muziek, maar ook voor de bijgeluiden. Dit maakt de bijgeluiden beter hoorbaar en dat is dan ook de reden, dat als de afsnijfrequentie van de luidspreker te dicht bij 16000 Hz ligt de bijgeluiden kunnen worden geaccentueerd.

Verder moeten we niet alleen de luidspreker of alleen de afspeelkop van een bandopnemer beschouwen, maar de gehele installatie. Het is niet altijd mogelijk alle onderdelen een weergavekarakteristiek te geven die recht is tot laten we zeggen 32000 Hz. Dit is het gemakkelijkste voor de versterker en met het oog op het tot op zekere hoogte verminderen van de eisen voor de andere delen, is het aan te bevelen de weergavekarakteristiek van de versterker recht te maken tot op z'n minst een octaaf boven de hoogste nog weer te geven frequentie.

5-4. Toe te laten afwijkingen

Als we de grenzen van de weergavekarakteristiek hebben vastgesteld is de gewenste nauwkeurigheid het volgende punt dat moet worden bekeken. In het ideale geval zou de totale weergavekarakteristiek een rechte horizontale lijn moeten zijn. In werkelijkheid kunnen afwijkingen niet worden voorkomen.

De minimum waarneembare veranderingen in de intensiteitsniveaus van zuivere tonen hangen af van de frequentie en de sterkte van de klanken. De algemeen geaccepteerde waarde is 1 dB, maar uit fig. 22

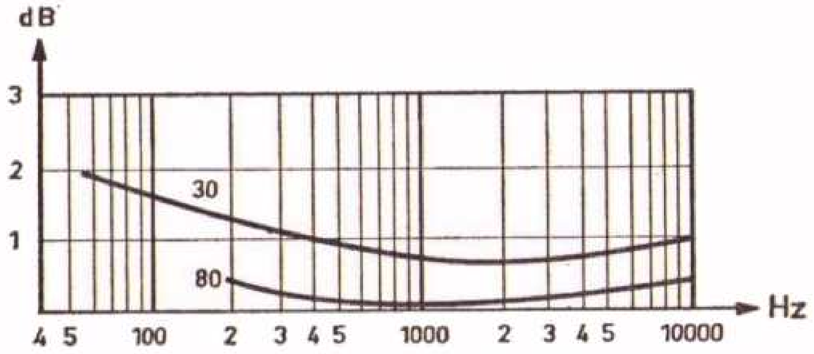


Fig. 22. De minimum waarneembare veranderingen in de intensiteit van zuivere tonen van 30 en 80 dB boven de gehoorgrens.

blijkt, dat dit alleen waar is voor lage intensiteitsniveaus [19] en dat in werkelijkheid veel kleinere verschillen kunnen worden gehoord, tenminste onder laboratorium-condities. Deze krommen gelden alleen als de intensiteit van de klank plotseling verandert. Verloopt er enige tijd tussen het geluid op het ene niveau en dat op een ander niveau, dan kan een groter verschil in intensiteit niet worden gehoord. Ook de verandering in

de sterkte van enkele tonen uit een zeer samengestelde muzikale klank kan niet zo gemakkelijk worden geconstateerd.

Tijdens enkele proeven, waarbij echte en gereproduceerde muziek werden vergeleken bleken twee ingenieurs, die de bedieningsknoppen instelden, de lage en hoge tonen weergave met een nauwkeurigheid van 1 dB te kunnen afregelen.

Als geen directe vergelijking met echte muziek mogelijk is, dat wil dus zeggen altijd, uitgezonderd bij speciale proefnemingen, zal een afwijking van de toon balans van 2 dB niet worden opgemerkt, zelfs niet door specialisten. Hieruit volgt, dat de toonregelingen van een elektro-akoestische installatie onder alle omstandigheden een instelling van de weergavekarakteristiek binnen 2 dB van het ideale geval, moeten mogelijk maken. Dit geldt echter alleen wanneer het uitgangssignaal van prima kwaliteit is en bijvoorbeeld niet als voor-oorlogse 78 toeren platen worden gespeeld.

Zelfs een optimist — zoals de schrijver — gelooft niet dat alle weergavekarakteristieken zo recht als een lineaal zijn, zoals in sommige advertenties! Vooral in elektro-akoestische apparaten zoals groeftasters, luidsprekers en afspeelkoppen van bandopnemers kunnen resonantieverschijnselen niet altijd worden voorkomen.

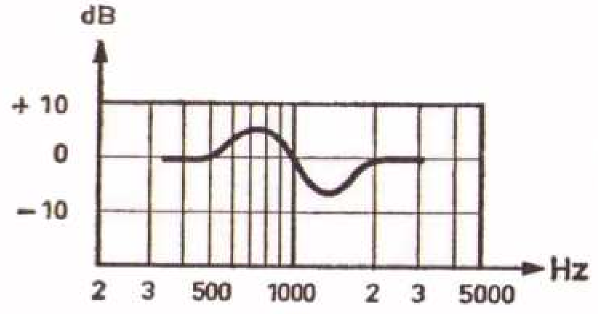


Fig. 23. Gedeelte van de weergavekromme van een goedkope luidspreker.

Fig. 23 laat een deel zien van een weergavekarakteristiek van een luidspreker die, we moeten het toegeven, niet tot de High Fidelity klasse behoort. De invloeden van de resonantiepiek bij 850 Hz en de dip bij 1200 Hz zijn in fig. 24 aangetoond [20]. Het elektrische signaal dat wordt toegevoerd is in *a)* aangegeven, een golftrein bestaande uit 16 volledige sinusperioden van resp. 850 en 1000 Hz. Het oscillogram *b)* toont de geluidsdruk, die door het signaal van 850 Hz wordt veroorzaakt, oscillogram *c)* is hetzelfde, maar de golftrein is daar onderdrukt, zodat alleen de „hang over" (natrillen) verschijnt. We zien, dat de 16 volledige perioden van de golftrein, die tezamen 20 milliseconde duurden, niet lang

genoeg duurden om de luidsprekerconus te dwingen met de maximum amplitude te trillen en de „hang over" duurde in werkelijkheid ongeveer 25 milliseconde. Het lijkt waarschijnlijk dat dergelijke afwijkingen en wel speciaal de „hang over" hoorbaar zullen zijn.

In fig. 24 *d* en *e* zijn de oscillogrammen getekend die bij 1000 Hz zijn opgenomen, in de laatste figuur weer met onderdrukte golftrein. Zij laten duidelijk zien, dat een dip in de weergavekarakteristiek even erg, zo nog niet erger is dan een piek. Dikwijls wordt iedere piek gevolgd door een dip bij een iets hogere frequentie en een dergelijke combinatie kan wel wenselijk zijn bij sommige installaties, maar is het zeker niet in een High Fidelity installatie. De elektrische analogieën van de piek en de dip zijn respectievelijk afgestemde parallel- en seriekringen met een kwaliteitsfactor Q van ongeveer 12,5. Dit is blijkbaar een grotere waarde dan kan worden toegelaten en feitelijk zouden vrije trillingen helemaal moeten worden voorkomen. Dat wil zeggen dat geen piek of dip kunnen worden toegelaten, welke het gevolg zijn van een elektrisch of mechanisch trillend systeem waarvan de Q-factor veel groter is dan 1. De piek of dip mag ook niet groter zijn dan 2 dB. Hieruit kan worden afgeleid dat de piek of dip, als zij niet kunnen worden voorkomen, niet veel smaller mogen zijn dan een octaaf.

Weergavekarakteristieken worden opgenomen door een signaal met een constante spanning en langzaam veranderende frequentie toe te voeren. Wanneer nu in een deel van een installatie de weergavekarakteristiek een piek vertoont en er in een ander deel in de weergavekarakteristiek juist een dip optreedt bij dezelfde frequentie en van dezelfde hoogte en breedte, dan zal de totale weergavekarakteristiek recht zijn. Wordt een muzikaal signaal toegevoerd dat min of meer plotselinge veranderingen in de amplitude vertoont, dan zullen de resonanties echter een belangrijke invloed uitoefenen behalve in het theoretische geval dat zowel de resonantiefrequenties als de Q-factoren van piek en dip precies gelijk zijn. In alle praktisch voorkomende gevallen zullen de verschillen voor de „hang overs" groot genoeg zijn om elkaar te versterken in plaats van elkaar op te heffen. De conclusie, die hieruit kan worden getrokken is dat compensatie van het ene resonantieverschijnsel door een ander een rechte weergavekarakteristiek kan opleveren, maar de weergavekwaliteit zal er niet veel beter door worden, àls ze beter wordt.

Compensatiekringen vinden we lang niet altijd in de schakelschema's omdat ze zelfs niet met opzet kunnen zijn aangebracht. Zo kan bijvoor-

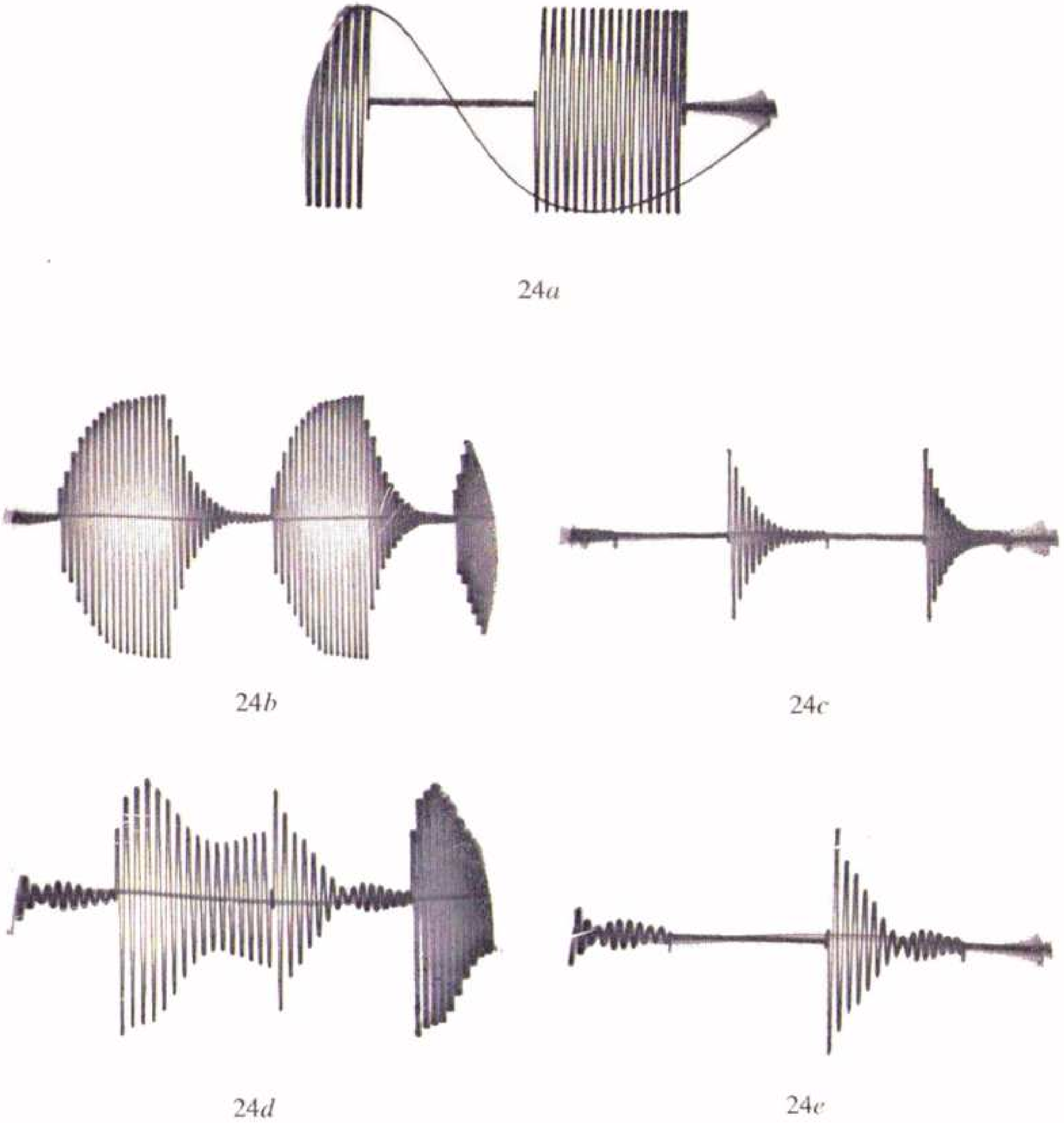


Fig. 24

a) Golftrein van 16 volledige sinussen, toegevoerd aan de spreekstoel van de luidspreker uit Fig. 23,

b) Akoestisch uitgangssignaal bij 850 Hz,

c) Zelfde als *b*), maar met onderdrukte golftrein,

d) Akoestisch uitgangssignaal bij 1000 Hz,

e) Zelfde als *d*) maar met onderdrukte golftrein.

beeld een serieresonantie in de uitgangstransformator van een versterker een resonantie compenseren in de afspeelkop van een bandopnemer. Dit kan gewoon het gevolg zijn van het feit, dat twee ontwerpers, die onafhankelijk van elkaar werkten, allebei probeerden de resonantiefrequentie te brengen op een in verhouding veilige hoge frequentie. Hoewel resonantiefrequenties de klank van zekere muziekinstrumenten meer kunnen beïnvloeden dan van andere instrumenten, zijn de verschillen te klein om een classificatie te maken zoals reeds eerder werd gedaan met de weergavekarakteristiek, het uitgangsvermogen en de vervorming.

5-5. Fazefouten

De fazeverschuivingskarakteristiek houdt verband met de weergavekarakteristiek. In het algemeen wordt aangenomen dat zeer grote fazeverschuivingen tot 360° kunnen worden toegelaten, maar proeven op dat gebied leveren niet altijd even overtuigende resultaten op. Sommige daarvan werden genomen met vierkante golven en periodieke kort durende signalen, afgeleid van de vierkante golven. Deze signalen zijn niet alleen zo onmuzikaal dat dit het oordeel kan vervagen, maar zij geven ook geen informaties over wat er gebeurt met niet periodieke kort durende signalen in de muziek.

Een interessant onderzoek werd verricht door Huggins [21] die witte ruis door een filter stuurde dat een behoorlijke fazeverschuiving over een beperkt frequentiegebied kon veroorzaken. De amplitudekarakteristiek van het filter was absoluut lineair, zodat het filter de samenstelling van de klank niet kon beïnvloeden.

Als dit gefilterde geluid werd toegevoerd aan de ene helft van een hoofdtelefoon en het ongefilterde geluid aan de andere helft, dan kon door de klank heen een zwakke toon worden gehoord waarvan de hoogte ruwweg overeenkwam met het frequentiegebied waarin de fazeverschuiving werd geïntroduceerd.

Een uitbreiding van deze proef werd enige jaren geleden in het Bell laboratorium gedemonstreerd. Hierbij konden fazeverschuivingen worden geïntroduceerd over verschillende frequentiegebieden van een ruis signaal. Dit kon in een bepaald ritme automatisch gebeuren en dicht bij de luidspreker kon zacht een eenvoudig wijsje, ik meen „Three blind mice" worden gehoord. Iets verder van de luidspreker was de fazeverhou-

ding reeds in zodanig mate verstoord, dat het wijsje niet langer kon worden herkend. Deze twee proeven wijzen erop, dat als fazeverschuivingen al van enig belang zijn, dat alleen het geval kan zijn bij stereofonische reproduktie. In hoofdstuk VIII zullen we daarop nader terugkomen.

In werkelijkheid zullen de fazeverschuivingen in versterkers met een zeer groot frequentiegebied en weinig vervorming zeer gering zijn en wel om de eenvoudige reden dat het anders niet mogelijk zou zijn de gewenste graad van tegenkoppeling te verkrijgen. De consequentie daarvan is dat de vervormingen in de verschillende trappen ook in faze zullen zijn en dus elkaar zullen versterken. Dit is echter als de vervorming toch al laag is, niet erg. De enig overblijvende factor is dat als de vervormende klanken in tegenfaze zouden zijn met de subjectieve vervorming, dat een compenserend effect zou hebben, een punt echter van weinig praktisch belang.

5-6. Frequentie en vermogen

Op de een of andere manier is nog steeds de gedachte blijven hangen, dat het akoestische systeem alleen maar grote spanningen of vermogens moet

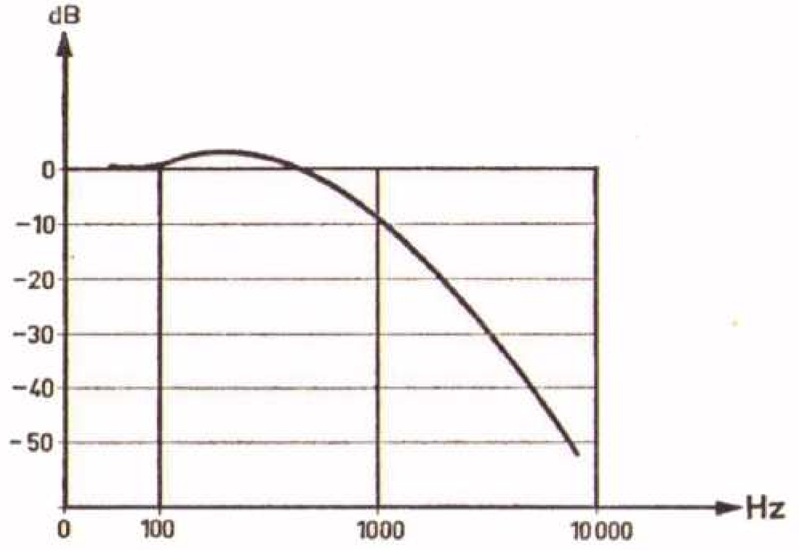


Fig. 25. Gemiddelde energieverdeling van een orkest van 75 man.

kunnen verwerken voor de lage frequenties. Het is waar, dat het gemiddelde vermogen in het algemeen groter is voor de lage frequenties dan voor de hoge frequenties. Fig. 25 [11] laat zien, dat het verschil aanmerkelijk

kan zijn. Wanneer vervormingsvrije weergave wordt verlangd moet het elektro-akoestische systeem echter niet worden bekeken op zijn nuttig effect als generator van akoestische energie. Hoewel er over een langere periode gerekend veel meer „bas-watts" zijn dan „hoge tonen watts" rechtvaardigt dit niet dat we een ernstige vervorming van de hoge tonen gedurende een kort tijdsverloop toe laten.

Bij sommige instrumenten en wel speciaal, hoewel niet uitsluitend, bij de slaginstrumenten, is de topenergie voor de hoge frequenties hoger dan voor de lage frequenties en als het geluid van een orkest, enkele blaasinstrumenten en menselijke stemmen wordt geanalyseerd blijkt het, dat de topenergieën behoorlijk regelmatig verdeeld zijn over het gehele hoorbare frequentiegebied. In fig. 26 geeft de getrokken lijn de topenergieverdeling

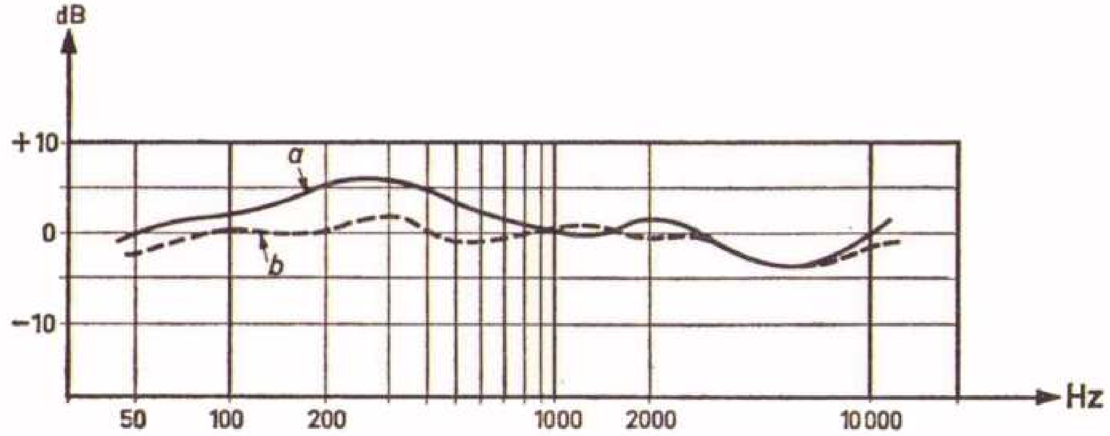


Fig. 26. Top energie verdeling.
a) directe muziek
b) geregistreerde muziek

van orkestmuziek aan, zoals deze is berekend uit gegevens verzameld door Sivian, Dunn en White [11]. Deze kromme is afgeleid van metingen, die in een concertzaal werden uitgevoerd. De streeplijn geeft de topenergieverdeling voor muziek weer zoals deze werd bepaald door John McKnight uit bandopnamen van 76 verschillende gevallen [9].

De twee krommen lijken zeer veel op elkaar wat bewijst dat zowel bij echte muziek als bij goed opgenomen muziek de topenergie in wezen onafhankelijk is van de frequentie. De onvermijdelijke conclusie is dan ook dat de installatie in staat moet zijn een volkomen onvervormd vermogen over het gehele hoorbare frequentiegebied te leveren. Slechts boven 16000 Hz mag de mogelijkheid tot het verwerken van grote vermogens wat minder zijn, hoewel ook daar niet al te veel. Hieruit volgt, dat gegevens over het uitgangsvermogen en de vervorming, die betrekking hebben op

slechts een frequentie, van weinig waarde zijn. Maar zelfs als het onvervormde vermogen over het gehele frequentiegebied is gegeven, dan nog moet een dergelijke kromme met enige voorzichtigheid worden beschouwd. Het uitgangsvermogen wordt dikwijls gemeten met de luidspreker vervangen door een weerstand. De impedantie van een luidspreker neemt toe bij toenemende frequentie en kan bij 15000 Hz wel 3 maal zo hoog zijn als bij 1000 Hz (zie fig. 27). Bij een versterker met een sterke stroomtegenkoppeling zal de stroom door de spreekspoel slechts weinig worden beïnvloed door deze toenemende impedantie, maar de spanning over de luidspreker zal veel hoger zijn dan bij lagere frequenties. Hieruit volgt, dat de versterker kan worden overbelast ook al leverden de metingen over een weerstand zeer goede resultaten op.

Wanneer de versterker voorzien is van spanningstegenkoppeling, dan zal de stroom door de spreekspoel afnemen bij hogere frequentie en het akoestische uitgangsvermogen zal dalen. Deze verschijnselen zijn veel minder wanneer een luidspreker wordt gebruikt waarvan de impedantie vrijwel onafhankelijk is gemaakt van de frequentie (streeplijn in fig. 27).

Fig. 27. Veranderingen in de impedantie van de spreekspoel
a) gewone luidspreker
b) luidspreker waarvan de impedantie nagenoeg onafhankelijk is van de frequentie.

In alle gevallen moet men bedenken, dat als het nodig is de hoge of de lage frequenties of beiden, op te halen om een akoestisch rechte weergave te krijgen, het vermogen, dat de versterker moet kunnen verwerken in gelijke mate moet worden vergroot.

In een versterkerschakeling treden ook omstandigheden op, die tot overbelasting of meer vervorming kunnen leiden dan aan de hand van gepubliceerde of gemeten krommen kan worden verwacht. De correctiefilters, die nodig zijn om een goede afspeelkarakteristiek te krijgen als een versterker is aangesloten op een bandopnemer of grammofoonopnemer, dempen de hoge frequenties meer dan de lage. Wanneer in enig deel van het systeem, dat vooraf gaat aan de correctiefilters, vervorming optreedt, dan zal de interferentietoon, die ontstaat, in verhouding belangrijker worden als het signaal eenmaal het correctiefilter is gepasseerd. Intermodulatievervorming moet daarom op een zodanige wijze worden gemeten, dat de twee uitgangsspanningen de juiste verhouding 4 : 1 hebben. Het feit, dat zij een dergelijke verhouding hebben aan de ingang is er geen garantie voor, dat aan deze voorwaarde is voldaan.
In aanmerkingnemend, dat de topenergie regelmatig over het gehele frequentiegebied is verdeeld, zal het blijkbaar juister zijn twee signalen van gelijke intensiteit te gebruiken. Intermodulatievervorming wordt bijna nooit op deze wijze gemeten. De 1 : 1 intermodulatievervorming van een goede versterker is ongeveer tweemaal de niet-lineaire vervorming (zie blz. 42 en aanhangsel), zodat zij op deze wijze gemeten niet boven ongeveer 0,75% mag uitkomen.

HOOFDSTUK VI

AFWIJKINGEN VAN DE TOONHOOGTEN

6-1. De juiste toonhoogte

Afwijkingen in de toonhoogte zijn alleen een probleem wanneer opgenomen muziek wordt gereproduceerd en zij veroorzaken de technici, die zich bezighouden met de versterking of het overbrengen van „echte" muziek geen moeilijkheden. De toonhoogte kan vrij snel om een gemiddelde waarde variëren (dit zal in de volgende paragraaf worden besproken). Zij kan ook constant afwijken van die van de echte muziek of zeer geleidelijk veranderen. Dergelijke toonhoogteveranderingen treden op als de snelheid van de opname (grammofoonplaat of band) bij het afspelen niet gelijk is aan die van de opname. In dat geval verandert niet alleen de toonhoogte, maar het tempo van de muziek zal ook worden beïnvloed.

Iemand, die naar een opname luistert, die wordt afgespeeld met een snelheid die iets te laag of iets te hoog is, kan óf de verandering van de toonhoogte óf het veranderde tempo óf beiden opmerken. Over het algemeen wordt er alleen maar aandacht besteed aan de toonhoogteveranderingen, maar het kan heel goed zijn, dat het onjuiste tempo, alleen of in verbinding met de toonhoogtefouten, tenminste enkele mensen onaangenaam aandoet. Er is maar weinig bekend over de nauwkeurigheid waarmee musici hun tempo aanhouden, behalve dan dat de nauwkeurigheid groot is.

Wij namen eens de tijd op van een klein dansorkest, dat eenzelfde foxtrot vijfmaal achter elkaar moest spelen en het verschil tussen de kortste en de langste speeltijd was toen maar drie seconden. Dat betekent dus een grootste afwijking van de gemiddelde speelduur van 173 seconden van slechts 0,87%.

Dansleraren houden ervan de platen op een te lage snelheid te draaien, tenminste voor beginners en het schijnt, dat 4% langzamer een enorm verschil uitmaakt voor hen, die dansen willen leren. Het blijkt dus dat kleine veranderingen in het tempo ook kunnen worden opgemerkt, zodat er dus bezwaren tegen kunnen worden gemaakt. Dit kan verklaren waarom de schrijver, die altijd grote moeite heeft met het onderscheiden van

de toonhoogte, het zonder veel moeite hoort als een grammofoon of bandrecorder slechts 2% te langzaam draait. Wij geloven echter te hebben geconstateerd, dat een afwijking naar de andere kant niet zo gemakkelijk wordt opgemerkt, behalve dan door ongeoefende dansers.

Wordt echter het tempo van verschillende dirigenten vergeleken, dan kunnen vrij grote verschillen worden gevonden. De ene dirigent kan een symfonie wel drie minuten vlugger spelen dan een andere, dit is een verschil in de orde van 10%. Daarom zijn de verschillen in interpretatie groter dan de toleranties. In dit geval kunnen we stellen, dat de afwijkingen van de afspeelsnelheid van de opname met het oog op de opneemsnelheid niet kleiner behoeven te zijn dan de interpretatie-toleranties, zolang deze klein zijn in vergelijking met de interpretatie-verschillen.

Na analyse van de toe te stane afwijkingen in toonhoogte vinden we, dat door luisteraars met absoluut gehoor, de toonhoogte-afwijking eerder zal worden opgemerkt dan een afwijkend tempo.

De toonhoogte van de instrumenten van een orkest wordt vergeleken met de hoogte van de standaard a^1. Deze stemtoon is in de loop der tijden gewijzigd. Enkele eeuwen geleden kon de a uit het eenmaal gestreept octaaf worden gestemd op een frequentie van slechts 420 Hz. Langzamerhand werd dit 435 Hz, welke frequentie algemeen was aanvaard tot 1935. Later werd op een internationale conferentie 440 Hz als internationale norm aangenomen. Individuele verschillen waren echter nog vrij groot. In 1938 hebben Balth v.d. Pol en Addink [22] de stemming bepaald van 450 verschillende radiomuziekuitzendingen. Hun bevindingen zijn in fig. 28

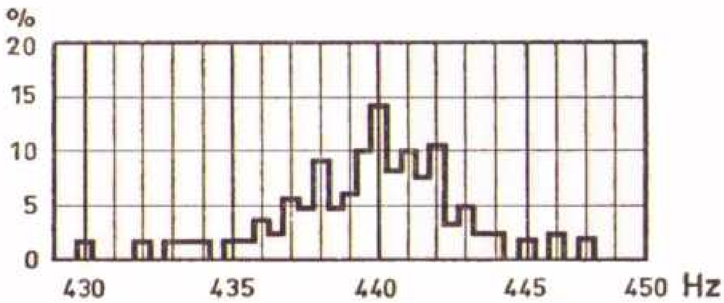


Fig. 28. Het verschil in stemming (a^1) zoals deze werd bepaald uit 450 uitzendingen van radiomuziek uit Engeland, Frankrijk, Duitsland en Nederland.

verzameld. Deze kromme laat duidelijk zien hoe groot de verschillen in toonhoogte waren, hoewel de gemiddelde waarde dicht bij 440 Hz ligt. Tegenwoordig houden de meeste orkesten zich veel beter aan de internationale stemming. Alleen oude kerkorgels konden niet opnieuw worden gestemd. Maar het is misschien goed ons te realiseren, dat oude violen,

zoals die van Stradivarius, tegenwoordig met een hogere toonhoogte worden bespeeld dan toen ze werden vervaardigd. Dat wil zeggen, dat de snaren strakker zijn gespannen en enkele musici hebben daartegen bezwaren geopperd. Deze violen toch klinken nu anders dan in de tijd, dat ze werden gemaakt.

Afwijkingen in de stemming van $1\frac{1}{2}$ Hz of meer ten opzichte van de 440 Hz, dat is 0,3%, zijn zelfs nu nog zeer goed mogelijk. Bovendien is de toonhoogte niet constant. Er zijn verschillende oorzaken, ten dele van muzikale, ten dele van technische aard, die maken, dat de toonhoogte tijdens de uitvoering verandert.

Op 27 oktober 1938 constateerden v. d. Pol en Addink [22] dat tijdens het stemmen, voorafgaande aan de uitvoering van het 1e pianoconcert van Beethoven door het Concertgebouworkest onder Willem Mengelberg, de frequentie van de a^1 van de piano precies 440 Hz was en van het orkest 441 Hz. In de crescendo's liep de stemming van het orkest op tot 443 Hz, doch daalde tot 441 Hz zodra de piano weer begon te spelen. Na de pauze begon het orkest met een symfonie van Brahms op 443 Hz, maar zakte later weer af tot 441,5 Hz en nam weer toe tot 442,5 Hz.

Dus zijn variaties van ongeveer 3 Hz in de stemming van het orkest ten opzichte van de stemtoon a^1 zeer goed mogelijk en daaruit volgt, dat afwijkingen, die tot 0,7% bedragen geen bezwaren opleveren. De toelaatbare snelheidsvariaties zijn dus op z'n minst 0,7% omdat blijkbaar een dergelijke afwijking niet door musici wordt opgemerkt. Of er al of geen bezwaren worden gemaakt tegen toonhoogtevariaties hangt af van de grootte van deze variaties en van de scherpte van het gehoor van de luisteraar.

Sommige luisteraars kunnen tonen met grote nauwkeurigheid herkennen. Dat is een aangeboren eigenschap. Zij, die een „absoluut gehoor" hebben en muzikaal geschoold, kunnen een toon noemen, die wordt gespeeld. Anderen zonder muzikale scholing kunnen de tonen niet noemen, maar kunnen wel de toonhoogte onwetend als juist herkennen.

Over het algemeen herkennen personen met absoluut gehoor, bewust of onbewust, de toonhoogte met een nauwkeurigheid van 2%. Dit is $^1/_3$ van een halve toon.

Enkele buitengewoon geoefende luisteraars en dat zijn meestal actieve musici, veelal violisten, kunnen afwijkingen van 0,75%, dat is $^1/_8$ van een halve toon constateren. Slechts een geval van een nog grotere nauwkeurigheid is er bekend. Enkele Chinese stemstenen (Lithophonen) uit de

Han dynastie bleken nauwkeurig tot op 0,15% of $^1/_{40}$ van een halve toon te zijn.

De toonhoogte-afwijkingen van het orkest kunnen in dezelfde richting of in een richting tegengesteld aan de toonhoogtevariaties van de reproduktie zijn. Over het algemeen zal de toonhoogte van een orkest als zij afwijkt van de standaard, hoger zijn, misschien ten gevolge van het feit, dat van de blaasinstrumenten als zij fortissimo worden bespeeld, de toonhoogte oploopt. Soms wordt de toonhoogte opzettelijk wat te hoog genomen. Zoals Pablo Casals zei: Een expressieve toon .... klinkt veel beter als hij iets te hoog wordt gespeeld dan als hij „op zijn plaats" wordt gespeeld.

Dus, daar de meeste orkesten nu met de standaard toonhoogte spelen en aangezien zeer zeker de concertvleugels op die hoogte zijn gestemd, kunnen we van de afwijkingen, zoals die werden geconstateerd tijdens de uitvoering van het Amsterdamse Concertgebouworkest zeggen, dat ze wel een muzikaal doel zullen hebben en dat zij dus niet moeten worden afgetrokken van de toelaatbare waarden voor de snelheidstolerantie. Hieruit volgt, dat ze voor mensen met een absoluut gehoor ± 2% bedragen en ± 0,75% voor de heel enkele luisteraar met een zeer scherp gevoel voor de toonhoogte. Houden we rekening met de opmerking van Pablo Casals dan zouden de tolerantiegrenzen dus misschien kunnen worden gewijzigd in — $1\frac{1}{2}$% tot + 2,5% voor de gewone luisteraar met een absoluut gehoor en — 0,25% tot + 1,25% voor de meest kritische luisteraars.

Als het zangers betreft schijnt het, dat de juiste aanzet slechts zelden wordt bereikt en dan alleen nog maar gedurende korte tijd en dat afwijkingen van 1% tot 3% en tijdens een vibrato zelfs tot 6% (halftoon) eerder regel zijn dan uitzondering. Hieruit volgt dat voor zangers de bovengenoemde toleranties zelfs nog wel wat groter kunnen worden genomen.

Een interessante proef werd genomen door J. de Boer [23], die een opname van de 5e symfonie van Beethoven op verschillende snelheden speelde en toen aan een groep luisteraars vroeg welke snelheid goed was. De resultaten ziet u in fig. 29. De voorkeur ging uit naar een 2,5% lagere snelheid dan de nominale draaisnelheid van de draaitafel. Bij de voorkeursnelheid werd de frequentie van de a^1 gemeten als zijnde 435 Hz.

De voorkeur kan ten dele worden verklaard uit het feit, dat ten tijde van deze proef het Amsterdamse Concertgebouworkest reeds op een hogere toonhoogte speelde dan die, waaraan de proefpersonen gewend waren. Ook toonde 70% van de proefpersonen weinig voorkeur voor de ene

snelheid of de andere en slechts 10% van de selecte groep hoorde werkelijk de verschillen. Het is interessant, dat bij een hogere snelheid (+ 3%) de kromme weer oploopt. Dit toont aan dat afwijkingen van de

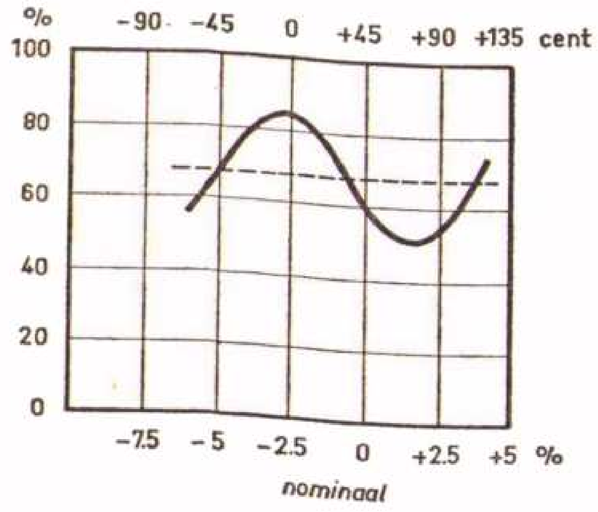


Fig. 29. Percentage luisteraars, dat de weergave bij verschillende draaitafelsnelheden als juist aangaf. De schaal aan de bovenzijde van de grafiek geeft de toonhoogteverschillen aan in cents ten opzichte van de toonhoogte waaraan de voorkeur werd gegeven.

toonhoogte belangrijker zijn dan tempovariaties. Bij deze snelheid is de muziek over een halve toon getransponeerd en wordt dus gehoord in een toonzetting, die hoewel niet juist toch bekender is dan een toonzetting daar tussen in. Uit deze kromme kunnen we opmaken, dat, vooropgesteld dat de muziek met de juiste intonaties werd uitgevoerd, een tolerantie van ± 0,75% in alle gevallen volkomen kan worden aanvaard en ± 2% in de meeste gevallen.

Een onderwerp, dat nog moet worden bekeken is de toelaatbare intonatiefout als opgenomen muziek wordt gebruikt voor de begeleiding van echte muziek. De voorwaarde is hier, dat de combinatie van die twee niet onharmonisch mag klinken. Of twee klanken dissonant zullen zijn hangt af van de afstand tussen hun frequenties. Als de afstand zeer klein is zal geen dissonantie worden gehoord.

In het geval van twee zuivere tonen van een lage frequentie met een frequentieverschil van 1%, zal geen dissonantie worden gehoord. In het gebied van 200 tot 500 Hz geeft een verschil in frequentie van ongeveer 18 Hz een hoogst onaangename dissonantie. Voor nog hogere tonen neemt de frequentie-afstand, die een maximum gewaarwording van dissonantie oplevert, geleidelijk toe tot 100 Hz.

Het dissonantieverschijnsel is nog steeds niet geheel duidelijk, niettegenstaande de geleerden zich al 2000 jaar met dit vraagstuk hebben beziggehouden. Het hangt echter af van de luidheid van de tonen en verdwijnt bij lage intensiteitsniveaus. Dit en het feit, dat de toelaatbare fre-

quentie-afwijking ook afhangt van de toonhoogte, maken het onmogelijk de toe te laten fouten in de afspeelsnelheid te berekenen. Voor de hogere harmonischen is een lager percentage afwijking toegestaan dan voor de grondtonen en de lagere harmonischen, maar als deze hoge harmonischen in verhouding geringe amplituden hebben, dan zal de dissonantie niet hoorbaar zijn.

Young [24] deed proefnemingen en vond daarbij dat 0,9% verschil in intonatie toelaatbaar was als een klarinet werd bespeeld bij een opgenomen begeleiding. Een verschil van 1,8% kon echter gemakkelijk worden opgemerkt.

Wij namen een proef met een piano, die tezamen met een opname van het 5e pianoconcert van Beethoven speelde en vonden, dat een verschil van 0,5% in de intonatie door geen enkele van de bij de proef aanwezige luisteraars werd opgemerkt. De pianist zelf, die natuurlijk zijn instrument luider hoorde dan de opgenomen begeleiding, hoorde afwijkingen van 1% niet, maar dat was wel het geval met enkele luisteraars. En dat niettegenstaande het feit, dat de pianist, evenals enkele van de andere bij de proef aanwezige personen, een absoluut gehoor had.

De waarden, die door Young voor de toegestane afwijking werden gevonden zijn wat hoger dan die waartoe wij kwamen. Dit kan misschien worden verklaard door de grotere nauwkeurigheid van zijn proeven. De nominale snelheid van de opname, die bij onze proef werd gebruikt, was door een van de luisteraars met absoluut gehoor ingesteld in vergelijking met de piano. Dit laat een fout toe van enkele tienden procent.

Hieruit volgt, dat in het geval van accompagneren, voor de snelheid een fout van 0,5% of misschien nog iets meer kan worden toegestaan, vooropgesteld dat het muziekinstrument goed is gestemd op het opgenomen orkest als de plaat of band met de juiste snelheid wordt gedraaid. Dat zal geen probleem zijn als het instrumenten betreft die geen vaste stemming hebben, zoals b.v. een viool. Bij instrumenten met een vaste stemming, zoals de piano, zal het over het algemeen nodig zijn het instrument en de opname op dezelfde toonhoogte te stemmen.

Een draaitafel met snelheidregeling zal dan de beste oplossing zijn. Zelfs concertvleugels zullen merkbare verschillen in stemming vertonen als de omgevingstemperatuur of het vochtgehalte van de lucht verandert.

Bovendien doet niet iedere pianostemmer zijn werk met dezelfde nauwkeurigheid. Hieruit volgt dat voor iedere uitvoering van een combinatie van echte en opgenomen muziek óf de piano óf het afspeelapparaat moet

kunnen worden gestemd. Als dat niet mogelijk is en de muziek dan iets disharmonisch klinkt, hoewel het misschien geen High Fidelity is, is het aan te raden de luisteraars zodanig op te stellen tussen de piano en de luidspreker, dat zij tegenover geen van beide zitten. Dissonantie is een zuiver monauraal verschijnsel. Wanneer een enkele toon wordt toegevoerd aan een enkel oor en een andere toon, die in disharmonie is met de eerste aan de andere oor, klinkt het niet disharmonisch. Hoewel bij deze opstelling de afscherming tussen de beide oren verre van goed is, helpt het toch.

6-2. Toonhoogtevariaties

Toonhoogtevariaties ontstaan dan, wanneer de snelheid, waarmee de opname wordt opgenomen of gespeeld, schommelt om de gemiddelde waarde. Dergelijke schommelingen treden altijd op en zelfs reclamemensen hebben het opgegeven ons te overtuigen dat het niet gebeurt, maar de toonhoogtevariaties kunnen gelukkig lang niet altijd worden gehoord. Of ze wel of niet worden gehoord hangt af van een aantal factoren, zoals de grootte en de frequentie van de snelheidsvariaties, de klanken, die worden gereproduceerd, de akoestische omstandigheden van de luisterruimte en van de luisteraar zelf.

Als het verschijnsel hoorbaar is en de frequentie van de schommelingen is minder dan 10 Hz, noemen we het janken of zweven, als de schommelingen sneller verlopen heet de storing „flutter". Hoewel dit twee namen voor een en hetzelfde verschijnsel schijnen te zijn, moeten we wel bedenken, dat janken en flutter verschillend klinken en in het algemeen verschillende oorzaken hebben. Janken is een draaitafelprobleem, flutter hoort meer bij een bandopnemer. De mensen zijn voor beide niet even gevoelig, sommige mensen schijnen eerder janken te horen en andere weer eerder flutter. Maar ook schijnt de kwaliteit van sommige klanken eerder door janken en andere weer door flutter te worden aangetast.

Het onderwerp, dat we nu bespreken verschilt in alle opzichten van dat wat in het begin van de vorige paragraaf werd beschreven. Daar ging het erom of een verandering van toonhoogte kan worden gehoord zonder dat er een referentietoon beschikbaar is. Hier is steeds een referentietoon beschikbaar omdat, als de snelheid met een zekere waarde vrij snel verandert, bijvoorbeeld in een seconde, dan zal de toonhoogte daarmee in overeenstemming veranderen. Als zij haar nieuwe waarde heeft bereikt ligt de

oude toonhoogte nog goed in de herinnering. Hieruit volgt, dat het mogelijk is dat luisteraars, die geen absoluut gehoor hebben, kunnen ontdekken wat er aan de hand is. Dat is een kwestie van het onderscheiden van frequenties. De grens van het onderscheiden van frequenties hangt voor een klein gedeelte af van het luidheidsniveau, maar dat kan buiten beschouwing worden gelaten voor de niveaus die bij de reproduktie van muziek optreden. Fig. 30 toont hoe de onderscheiding van de toonhoogte afhankelijk

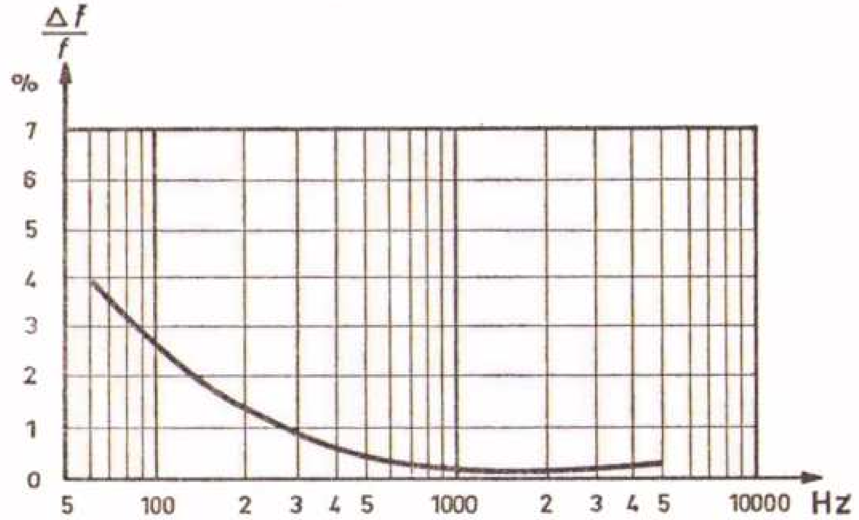


Fig. 30. De kleinste waarneembare verandering in toonhoogte $\triangle f/f$ als functie van de frequentie.

is van de frequentie van de tonen [25]. In het gebied van de zeer lage frequenties zijn verschillen van 3% nog juist hoorbaar, maar in het gebied van 500 tot 10.000 Hz kunnen afwijkingen van 0,3% worden opgemerkt en voor het gebied van de maximum gevoeligheid van het oor ligt de drempel van de onderscheiding van toonhoogten bij slechts 0,2%. De vrij hoge drempelwaarde voor de lage frequenties kunnen ons verdacht voorkomen wanneer we de moeilijkheden in aanmerking nemen, die we dikwijls tegenkomen bij de reproduktie van lage tonen van de piano. We moeten ons echter realiseren, dat veel van de harmonischen van een dergelijke lage noot binnen het gebied zullen vallen waar ons gehoor zeer gevoelig is voor veranderingen van de frequentie. Dit verklaart meteen, waarom de kromme van fig. 30 niet direct kan worden gebruikt voor samengestelde klanken.

In het geval van jank en flutter zijn de snelheidsvariaties en dus ook de frequentievariaties, periodisch. De frequentie van deze variaties heeft invloed op hun hoorbaarheid. Voor tonen van 100 Hz is de tijd, die nodig

is om de hoogte van de toon te herkennen, ongeveer 50 milliseconde is, bij 1000 Hz is hij 20 milliseconde en iets minder, ongeveer 16 milliseconde bij 4500 Hz. Dat wil zeggen, dat als de gemiddelde hoogte van de toon 100 Hz is en de frequentie varieert meer dan tienmaal per seconde, van laag tot hoog en weer terug naar laag, het niet erg hoorbaar zal zijn. Bij een toon van 1000 Hz zullen de toonhoogtevariaties niet meer worden opgemerkt als de frequentie van de schommeling groter is dan 25 Hz en bij een toon van 4500 Hz zal de hoorbaarheid van de zweving vrijwel geheel verdwijnen als de zwevingsfrequentie boven de 30 Hz komt. Daarom kunnen snelle zwevingen niet zo gemakkelijk worden opgemerkt als zwevingen van een lagere frequentie.

Eveneens zal jank, als deze een zeer lage frequentie heeft niet zo gemakkelijk worden geconstateerd. Als de frequentieschommelingen zeer langzaam zijn, hoort het oor de nieuwe frequentie een zodanige tijd na de oude frequentie, dat deze laatste alweer „vergeten" is. Het kleinste merkbare verschil in de toonhoogte van zuivere tonen, die zonder directe vergelijkingsmogelijkheid kunnen worden gehoord, ligt in de orde van 10% bij 100 Hz, 6% bij 400 Hz, 3,5% bij 1000 Hz en 3% bij 4000 Hz. Deze waarden werden gemeten door de luisteraars twee tonen te laten horen, gescheiden door een pauze. Voor het bepalen van fig. 30 wisselden de twee tonen elkaar af zonder enige onderbreking. De hier gegeven waarden gelden voor de doorsnee luisteraar, enkele luisteraars kunnen kleinere intervallen horen, maar dat beïnvloedt niet de conclusie, dat de gevoeligheid van het oor voor zeer langzaam janken aanmerkelijk minder is dan uit fig. 30 zou volgen.

In het algemeen zal de waarnemingsgrens voor jank en flutter als functie van jank- of flutterfrequentie een vorm hebben zoals deze is aangegeven

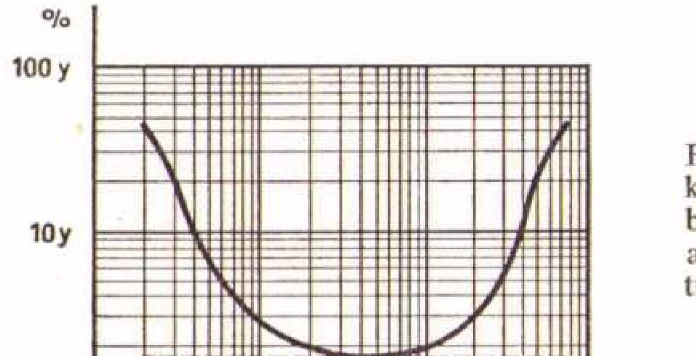


Fig. 31. Algemene vorm van de kromme, die de minimum waarneembare hoeveelheid jank of flutter aangeeft als functie van de fluctuatiefrequentie.

in fig. 31. Zonder de invloeden van de waarnemingstijd-„vlek" en van de geringere waarneming van zeer langzame frequentieveranderingen, zou de jank-flutterdrempelwerking worden voorgesteld door de streeplijn in deze figuur.

Deze afhankelijkheid van de hoorbaarheid van jank van de frequentie van de toonhoogteveranderingen is vrijwel gelijk aan het verband tussen de hoorbaarheid van disharmonie en de interferentiefrequentie. Dit is niet helemaal toevallig. Volgens de laatste inzichten [26] neemt het oor, als het twee gelijktijdig optredende signalen opvangt, eerst gedurende een halve periode van de interferentietoon alleen de hoogste frequentie waar, gedurende de tweede halve periode van de interferentietoon de laagste van de twee frequenties en zo verder. Bij lage intensiteitsniveaus kan geen dissonantie optreden.
In het geval van jank/flutter heeft de wisseling van twee frequenties buiten het oor plaats. Dit zal ook optreden en hoorbaar blijven bij lagere geluidsintensiteitsniveaus, maar het zal dezelfde gehoorsgewaarwording als dissonantie opleveren — jankgeluiden klinken min of meer naast de stemming en flutter scherp als een zeer ernstige dissonantie. Hieruit volgt, dat als er een weinig dissonantie in de muziek aanwezig is, zoals in het geval van een piano, die gestemd is om „expressief" te klinken, de grens van het waarnemen van jank aanmerkelijk kan worden verlaagd.

Dit brengt ons op de muzikale toon als tegenstelling tot de zuivere toon. Karakteristiek van de muzikale toon is dat hij uit vele componenten bestaat, alle van beperkte duur en van verschillende intensiteit. Bij tonen, die kort duren zal het moeilijk zijn jank of zweving te horen, de reproduktie van lang aangehouden tonen is veel kritischer. Deze zijn dikwijls van een vrij lage frequentie en dan worden de grondtonen minder beïnvloed door jank en flutter dan de boventonen. De harmonischen van een lage toon liggen zeer zeker dicht bij het kritische gebied. Tot op een zekere hoogte zullen deze harmonischen voor een gedeelte worden gemaskeerd door de grondtoon en de lagere harmonischen, wat de reden is dat de jank minder hoorbaar kan zijn. Het muzikale signaal is echter te gecompliceerd om de berekening van de invloed van de aanwezigheid van lage frequenties op de hoorbaarheid van jank, toe te staan. Tonen van een hogere frequentie zijn meer het slachtoffer van flutter dan van jank en daardoor worden instrumenten als de hobo, piccolo en blokfluit, waarop lang aangehouden hoge noten kunnen worden voortgebracht, niet altijd goed zuiver gereproduceerd.

Daar berekening niet mogelijk is moeten we tot proeven overgaan om de toelaatbare jank/flutterniveaus vast te stellen. Dergelijke proeven zijn genomen door Stott en Axon [27], die een installatie construeerden, waarmee een meetbare hoeveelheid jank of flutter in de muziek kon worden gebracht. Het meest kritische instrument was, zoals werd verwacht, de piano en de meest kritische luisteraars waren, zoals ook werd verwacht, de vrouwen.

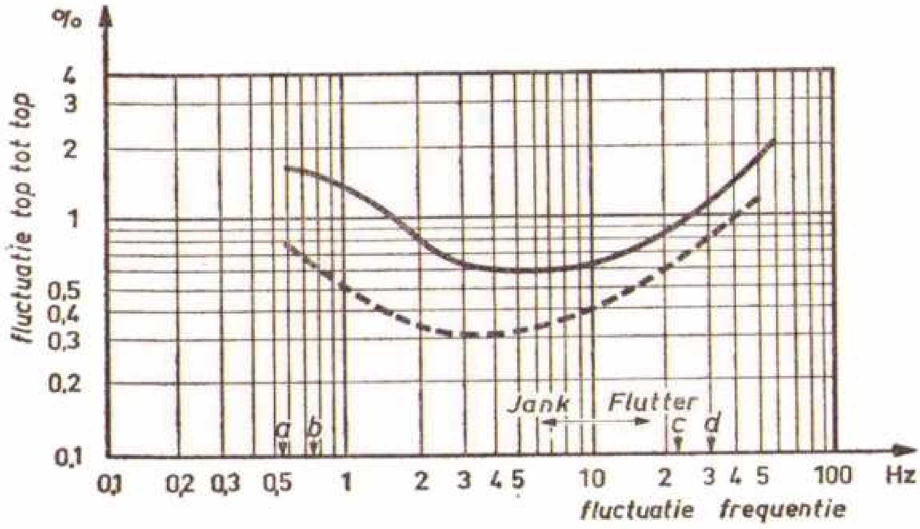


Fig. 32. Waarnemingsdrempel van jank en zweving (top tot top waarden) voor de meest kritischen onder een groep dames, die naar de luidsprekerweergave van pianomuziek luisterden.

a) draaitafelsnelheid $33^1/_3$ toeren per minuut
b) draaitafelsnelheid 45 toeren per minuut
c) snelheid aandrijfas 1500 toeren per minuut
d) snelheid aandrijfas 1800 toeren per minuut

Fig. 32 laat de ten naaste bij juiste klank/flutter waarnemingsgrenzen als functie van de fluctuatiefrequentie voor pianomuziek zien. Op de ordinaat is het percentage fluctuatie van de frequentie van het muzikale signaal in top tot top waarden aangegeven. Dit is dus de waarde van de laagste ogenbliksfrequentie van elk van de componenten van de klank afgetrokken van de hoogste ogenbliksfrequentie van dezelfde deeltoon en het verschil gedeeld door de gemiddelde frequentie. In deze grafiek zijn ook de fluctuatiefrequenties aangegeven van de snelheid van een draaitafel, die met $33\ ^1/_3$ en 45 toeren draait en van de as van een bandopnemer, die in Europa meestal 1500 toeren zal maken en in Amerika 1800 toeren.

Jank en flutter behoeven niet speciaal voor te komen bij de aangegeven frequenties, maar deze zijn wel dikwijls de belangrijkste. Gelukkig

wil dat zeggen dat de eisen over het algemeen niet zo nauwkeurig zijn als het laagste punt van de waarnemingsgrens ons zou kunnen doen vrezen.

Stott en Axon zijn van mening dat jank en flutter, om door de zeer kritische luisteraar niet te kunnen worden waargenomen, een factor 2 minder zouden moeten zijn dan de waarden, die overeenkomen met de getrokken kromme in fig. 32.

Zo zou dus bij 0,55 Hz de jank slechts 0,9% top tot top moeten zijn en bij 5 Hz zou alleen 0,3% kunnen worden toegelaten. Deze laatste waarde komt zeer dicht overeen met het maximum voor de onderscheiding van de toonhoogte, dat volgens fig. 30 bij ongeveer 2000 Hz ligt. We moeten bedenken dat de getrokken kromme geldt voor alle, uitgezonderd de zeer kritische, luisteraars. De streeplijn toont de toelaatbare jank of flutter voor een toon van 1000 Hz voortgebracht door een hoofdtelefoon. Het oor is zeer gevoelig voor toonhoogtevariaties als een zuivere toon van 1000 Hz wordt gereproduceerd en onze eigen ondervinding wijst er ook op, dat de streeplijn in fig. 32 de maximum toelaatbare fluctuaties beter aangeeft dan de getrokken lijn.

Fig. 31 en 32 laten zien, dat het vermelden van jank-waarden weinig waarde heeft wanneer daarbij niet tevens de frequentie van de fluctuatie wordt opgegeven. Dit zou echter proeven op grote schaal met jank onmogelijk maken en zelfs laboratoriumproeven zouden zeer ingewikkeld worden. Het is daarom gebruikelijk een netwerk in de proefinstallatie op te nemen, dat alle jank in verband brengt met één frequentie. Dus zal bijvoorbeeld een jank met een fluctuatiefrequentie van 4 Hz en een fluctuatie van 0,2% op het instrument een jank van 0,2% aangeven. Maar

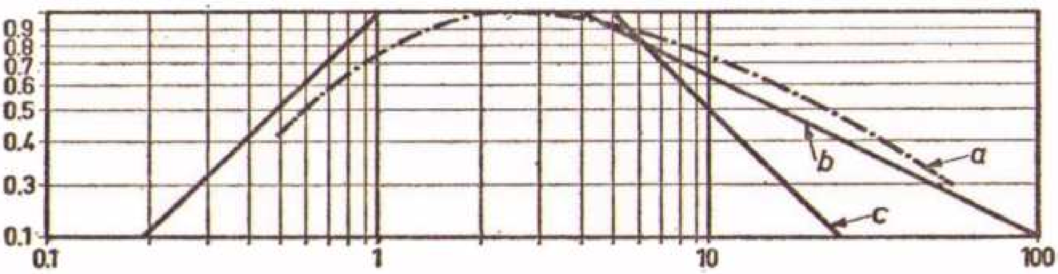


Fig. 33. De verminderde waarneming van jank bij verschillende frequenties.

a) volgens Stott en Axon (BBC)*
b) volgens Zwicker (Duitsland)
c) volgens Mackenzie (S.M.P.E.)**

* British Broadcasting Corporation
** Society of Motion Picture Engineers, thans: S.M.P.T.E. = Society of Motion Picture and Television Engineers

als de fluctuatiefrequentie 0,5 Hz is en de karakteristiek overeenkomt met kromme *c* in fig. 33, dan zal 0,4% jank ook als 0,2% worden aangegeven. Evenzo zal een zweving van 0,4% en een frequentie van 16 Hz worden aangegeven als 0,2%.

Door alle jank en zweven toe te schrijven aan een gemeenschappelijke fluctuatiefrequentie kan de weergavekwaliteit van een deel van de installatie direct worden vergeleken met dat van een andere installatie, terwijl de absolute kwaliteit eveneens wordt bepaald. Helaas bestaat er geen algemene overeenstemming over de vorm van de kromme. De getrokken kromme *b*, die door Zwicker is voorgesteld, wordt door vele instellingen gebruikt, de lijn *c*, die afkomstig is van Mackenzie, wordt in Amerika gebruikt door de S.M.P.E. *), kromme *a* komt overeen met die van Stott en Axon.

De proeven, waarop fig. 32 betrekking heeft, werden genomen met een nauwkeurig gestemde piano. Piano's, die zijn gestemd op „expressief" geluid kunnen kritischer zijn. Tegenwoordig vermijden platenmaatschappijen, die dit weten, het gebruik van op een dergelijke wijze gestemde piano's. De wijze waarop de toonhoogte schommelt rond de gemiddelde waarde, heeft een zekere invloed op de hoorbaarheid van jank. Wanneer we de jank beschouwen als een soort frequentiemodulatie, dan kan b.v. de modulatie een sinusgolf, een zaagtand of een vierkante golf zijn.

Volgens sommige onderzoekers is de invloed van de vorm van de modulerende golf zeer klein. Anderen ontkennen dit. Inderdaad tonen de onderzoekingen van Shower en Bidulph [25] op het gebied van de onderscheiding van de toonhoogte een opmerkelijk verschil tussen sinusvormige en plotselinge frequentievariaties, maar alleen voor de frequenties onder 500 Hz, die minder geneigd zijn hoorbare jank te veroorzaken.

De proeven van Stott en Axon bewezen dat het verschil voor flutter te verwaarlozen klein was, maar aanmerkelijk voor langzame jank. De meest voorkomende modulatie is ongeveer sinusvormig en andere waarschijnlijke golfvormen leverden geen grenswaarden voor de waarneming op, die veel afweken van die welke voor sinusvormige modulatie gelden. In het geval van een sinusvormige modulatie kan voor de jank en flutter de effectieve waarde worden gebruikt in plaats van de top tot topwaarde, door deze laatste te delen door 2,8. Wanneer het oor op de effectieve

*) S.M.P.E. Society of Motion Picture Engineers. Thans S.M.P.T.E. = Society of Motion Picture and Television Engineers. (Noot van de vertaler.)

waarde van de jank zou reageren, dan zou deze ook voor andere modulatietypen kunnen worden berekend. Daar zou de top tot topwaarde natuurlijk door een ander getal dan 2,8 moeten worden gedeeld.

Of de hoorbaarheid van jank afhangt van de top tot topwaarde of van de effectieve waarde is nog steeds niet met zekerheid vastgesteld. Wij geloven, dat de top tot topwaarde van de jank de bepalende factor is voor zover het de hoorbaarheid betreft. Nochthans is het gewoonte geworden de effectieve waarden te publiceren, tenminste in commerciële literatuur. Deze zijn soms verkregen door de top tot topwaarden te delen door 2,8. Dit wordt zelfs gedaan als de jank/flutter geen sinusfuncties zijn. Om een directe vergelijking mogelijk te maken met de waarden, die voorkomen in technische gegevens zullen deze „effectieve" waarden in Hoofdstuk X worden gebruikt.

Het oor is gevoeliger voor jank en flutter wanneer het geluid door luidsprekers wordt weergegeven dan wanneer hoofdtelefoons worden gebruikt. Dit kan worden veroorzaakt door het feit, dat het directe geluid van de luidspreker het oor van de luisteraar bereikt op een ogenblik, dat het gereflecteerde geluid, dat de luidspreker iets eerder verliet, nog van een behoorlijke sterkte is (zie fig. 10). Op deze wijze kunnen de frequenties van de twee geluiden direct worden vergeleken en er kan dissonantie hoorbaar zijn. Dit verschijnsel zal natuurlijk afhangen van de afstand tussen de luidspreker en de luisteraar, de akoestiek van de kamer en het zal ook tot op zekere hoogte afhangen van de luidheid (zie blz. 75). De proeven van Stott en Axon met pianomuziek, waarvoor fig. 32 geldt, werden genomen met luidsprekers en de meest kritische waarden werden gevonden in vrij harde ruimten, dat zijn ruimten waarin de nagalmtijd langer is dan als normaal wordt beschouwd.

Een ander punt, dat moet worden bekeken is de gevoeligheid van het oor voor amplitudemodulatie. Snelheidsvariaties zullen overeenkomstige variaties in de amplitude veroorzaken, tenminste als het gaat om bandopnemers en platenspelers, die voorzien zijn van een magnetische of dynamische groeftaster.

Het oor is zeer gevoelig voor kleine amplitudeveranderingen (zie fig. 20); bij 1000 Hz kunnen veranderingen van minder dan 0,2 dB (2%) worden gehoord. Ook hier hangt het waarnemen weer af van de frequentie van de toon en van de fluctuatie. Vergelijking van fig. 34, die bepaald is door Stott en Axon [27] en fig. 32 laat zien dat de invloed van amplitudemodulatie aanmerkelijk minder is dan van frequentiemodulatie. Wanneer

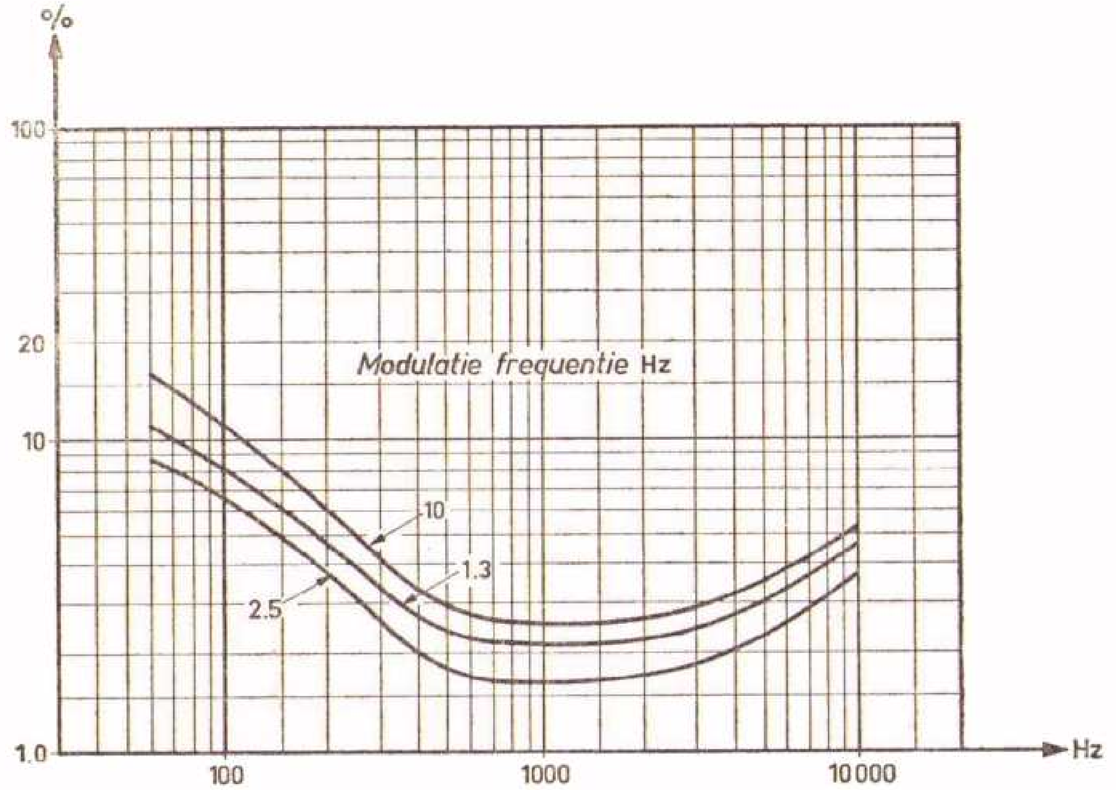


Fig. 34. Waarnemingsdrempel van amplitudemodulatie als functie van de frequentie van een toon.
De modulatiefrequentie is bij iedere kromme aangegeven.

beide vormen van modulatie in het geval van jank even sterk zijn (percentage snelheidsverandering = percentage frequentieverandering = percentage amplitudeverandering) zal het de frequentiemodulatie van het signaal zijn, waartegen het eerst bezwaren zullen worden gemaakt. Alleen staande golven in de luisterruimte kunnen bij zekere frequenties van de toon hoorbare amplitudemodulatie veroorzaken. Staande golven zijn zeer sterk afhankelijk van de frequentie. Een frequentieverandering van slechts enkele periodes per seconde kan op een bepaalde plaats in de kamer een verandering van wel 10 dB in de geluidsdruk veroorzaken. Als de jank 0,5% is (top tot top) is het zeer goed mogelijk dat een luisteraar de frequentiemodulatie niet zal horen. De frequentiezwaai van 0,5%, dat is 5 Hz kan echter, wanneer een toon van 1000 Hz wordt gereproduceerd, het beeld van de staande golven aanzienlijk veranderen en op de plaats van de luisteraar schijnbaar een amplitudemodulatie van veel meer dan 2% veroorzaken.

Dit kan worden gedemonstreerd door een constante toon van een laagfrequentiegenerator te reproduceren en dan ons hoofd, terwijl we er naar luisteren, vrij snel heen en weer te schudden. Op bepaalde plaatsen in de kamer kunnen we dan een verschijnsel dat op jank lijkt waarnemen. De

voor de hand liggende, maar daarom nog niet eenvoudige oplossing is zoveel mogelijk het ontstaan van staande golven te voorkomen. Hier is het weer wenselijk dat de ruimte niet te sterk weerkaatst. Opgemerkt dient te worden dat kunstmatige nagalm niet dezelfde uitwerking heeft op de vorm van staande golven in de ruimte als de natuurlijke nagalm.

Niet alle soorten muziek zijn even gevoelig voor jank en flutter. Zang en vioolspel gaan dikwijls vergezeld van een vrij opvallend vibrato, dat de hoorbaarheid van de jank, die door de installatie wordt veroorzaakt, vermindert. Bij andere instrumenten zijn de klanken zodanig aan veranderingen onderhevig gedurende de tijd dat zij klinken, dat ook hier moeilijk van jank kan worden gesproken. Zijn er geen lang aangehouden tonen in de muziek, dan zullen snelheidsvariaties niet zo gemakkelijk jank of flutter veroorzaken. Wij hebben dit samengevat in tabel 11, waarin de *geschatte* toelaatbare jank voor de meest kritische luisteraars is aangegeven. Opgenomen zijn de top tot topwaarden en de „effectieve" waarden, die gelijk zijn aan de top tot topwaarden gedeeld door 2,8.

Tabel 11

	Top tot top in %	Effectief in %
piano	0,6	0,22
hobo/hoorn	0,7	0,25
viool	0,8	0,3
cello	0,8	0,3
symfonie orkest	0,8	0,3
dansorkest met piano	0,8	0,3
zang (solo)	0,9	0,32
harp	0,9	0,32
zang (koor)	1	0,36
kopergroep	1	0,36
dansorkest zonder piano	1	0,36
koor	1,2	0,45
jazz	1,5	0,56

Op pag. 68 werd verteld, dat de toonhoogte van een orkest met ongeveer 0,5% toeneemt tijdens een crescendo en hetzelfde gebeurt ook met vrij veel instrumenten als zij fortissimo worden bespeeld. Algemeen wordt aangenomen, dat de snelheid van de draaitafel van een platenspeler afneemt als een luid deel van de muziek wordt afgetast. Dat is echter niet juist. In werkelijkheid toch neemt de wrijving tussen de naald en de plaat af als de modulatie sterker wordt [28]. Hieruit volgt, dat als deze wrijving een merkbare invloed op de draaitafelsnelheid heeft,

deze dezelfde invloed op de toonhoogte heeft als het spelen van een fortissimo. Gewone jankmetingen omvatten niet de meting van dit verschijnsel, waarvan de invloed moeilijk is te bepalen omdat de traagheid van de draaitafel de invloed van de verandering van de wrijving zal vertragen. Dat de invloed van een fortissimo op de draaitafelsnelheid en dus op de toonhoogte in dezelfde richting werkzaam is als de directe invloed op de toonhoogte van het orkest, is een samengaan dat misschien de hoorbaarheid van mogelijke modulatiejank vermindert.

HOOFDSTUK VII

ACHTERGROND BIJGELUIDEN

7-1. Bijgeluiden in de kamer

Het onderwerp „achtergrondbijgeluiden" omvat alle bijgeluiden, behalve vervorming, die kunnen worden gehoord in de ruimte waarin wordt geluisterd en die geen deel uitmaken van het gewenste geluid. Zij kunnen in de opneemstudio aanwezig zijn geweest en tegelijk met de muziek zijn geregistreerd, zij kunnen worden veroorzaakt door onvolkomenheden in de installatie of ze kunnen optreden in of buiten de ruimte waar wordt geluisterd.

De omgevingsbijgeluiden in de luisterruimte, hoe hinderlijk zij ook mogen zijn, hebben het voordeel, dat zij veel andere achtergrondgeluiden maskeren en daardoor de technische eisen veel minder streng maken. Een absoluut stille ruimte voor luisterdoeleinden is een vrijwel absolute onmogelijkheid. De stilste ruimten, die de schrijver persoonlijk kent zijn de drie echovrije ruimten voor akoestische proefnemingen in het Philips Laboratorium. Wanneer men deze dubbelwandige, van dubbele deuren voorziene ruimten, die van zeer dikke lagen geluidsabsorberend materiaal zijn voorzien, binnentreedt, dan gelooft men dat deze absoluut stil zijn, maar na enige tijd hoort men geluiden, die ontstaan door de aanwezigheid van de luisteraar, die niet kan ademen zonder geluid te produceren en wiens hart ook hoorbaar klopt.

De prijs van een dergelijke echovrije ruimte is ongeveer dezelfde als van een mooie bungalow ergens in de vrije natuur. Hier zal het — als men alleen is — zeer stil zijn, maar het zal altijd nog waaien, het huis zelf zal kraken en ook andere geheimzinnige natuurgeluiden zullen optreden. Een dergelijke afgelegen bungalow vormt al een grote uitzondering en als de eigenaar ook nog een installatie heeft voor de verlichting enz. dan is de stilte ver te zoeken. Een feit is, dat zelfs accumulatoren nog zwakke geluiden produceren.

Enkele ongewenste bijgeluiden kunnen natuurlijk worden voorkomen. Kopjes en glazen in de kamer mogen niet rinkelen, zelfs niet als de muziek luid is en de mensen moeten niet praten. Maar in het grootste

gedeelte van de gevallen, zelfs als we denken dat dit niet zo is, zijn de achtergrondbijgeluiden in een woonkamer zeer aanzienlijk. Het komt alleen doordat we altijd tussen die geluiden leven dat we ze niet opmerken. We kunnen dat voor onszelf nagaan door in de namiddag de volumeregelaar zodanig in te stellen dat het prettig luisteren is en dan met de volumeregelaar in dezelfde stand hetzelfde nummer nog eens te spelen om 3 uur 's morgens. De kamergeluiden zijn dan aanmerkelijk minder dan overdag en de muziek zal veel luider klinken evenals de brom en de ruis.

Op normale uren zal het niveau van de bijgeluiden in een woonkamer hoger liggen dan in de studio, waar speciale voorzorgen zijn genomen en veel geld is besteed om het niveau van de bijgeluiden laag te houden. Hieruit volgt, dat tijdens de reproduktie de studio-bijgeluiden door die van de kamer zullen worden overstemd. Soms, als opnamen worden gemaakt in concertzalen, wordt het verkeer in de omliggende straten stop gezet en in andere gevallen worden de opnamen laat in de nacht gemaakt. Algemeen aanvaarde waarden voor de toelaatbare niveaus van bijgeluiden zijn in tabel 12 aangegeven.

Tabel 12

opneemstudio	20-25 dB
radiostudio	20-30 dB
theaters en concertzalen	25-35 dB
stille huizen	33-39 dB
gemiddelde huizen	39-47 dB

Deze getallen gelden voor onbezette ruimten, de aanwezigheid van publiek zal natuurlijk het niveau van de bijgeluiden verhogen. Overigens zijn de waarden voor de bijgeluiden in ruimten afgeleid van metingen, die meer dan twintig jaar geleden werden uitgevoerd door Seacord en Hoth. Nadien is de bevolkingsdichtheid aanmerkelijk toegenomen, zowel in Amerika en Engeland als overal elders en het aantal vliegtuigen en auto's is nog veel sterker gestegen. Auto's zijn niet veel stiller geworden, vliegtuigen maken veel meer lawaai dan toen en in Nederland zijn er wel een miljoen bromfietsen en scooters, die voldoende geluid produceren om meerdere straalvliegtuigen te beschamen.

Hieruit volgt. dat tegenwoordig voor het overgrote deel van de woonplaatsen het werkelijke niveau van de bijgeluiden hoger zal zijn dan die welke in tabel 12 zijn aangegeven. Voor onze volgende beschouwingen zullen we uitgaan van het spectrum bijgeluiden in ruimten zoals dit door Hoth [29] voor een normale kamer is vastgesteld op een totaal niveau van 43 dB.

Dit spectrum is getekend in fig. 35.

Wordt er een raam geopend, dan zal het ruisniveau toenemen met zo'n 6 tot 12 dB en er zullen meer hoge frequentie componenten zijn. Hetzelfde

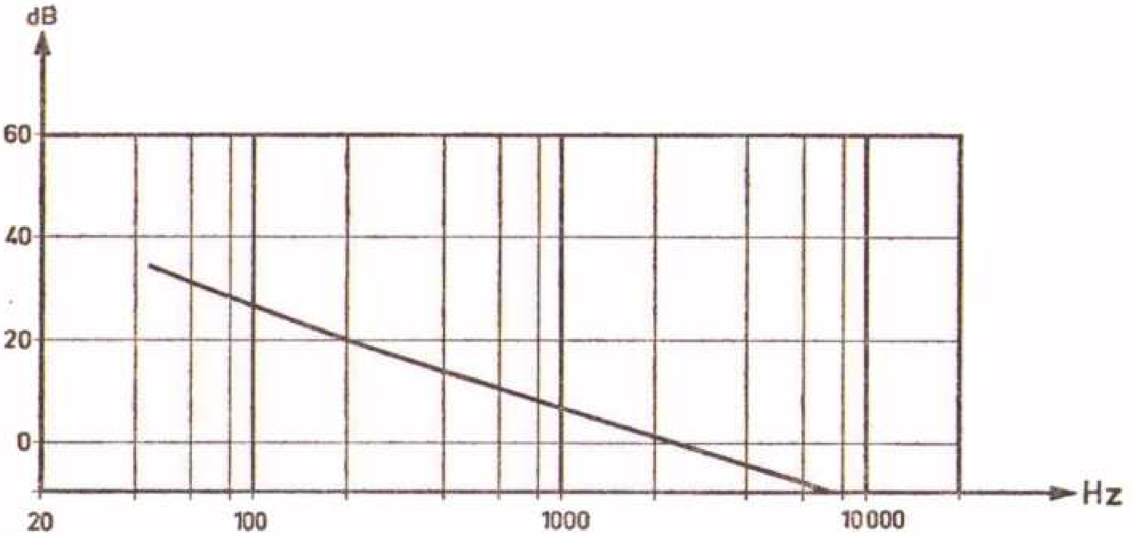


Fig. 35. Spectrum van omgevingsbijgeluiden in een normale kamer, waarin geen geluid wordt geproduceerd.

is het geval als er een aantal mensen in de ruimte aanwezig zijn. Hieruit volgt, dat de voorwaarden van fig. 35 als behoorlijk optimistisch kunnen worden beschouwd en zeer zeker niet als overdreven.

7-2. Bijgeluiden van de installatie en maskering

De bijgeluiden van de installatie waarmee we hebben te maken worden voor een deel door de luidspreker voortgebracht. Dit gedeelte bevat brom, dreun, versterkergeruis, bandgeruis en naaldgeruis. De installatie kan ook direct bijgeluiden veroorzaken, zoals transformatorbrom, bijgeluiden van het aandrijfmechanisme en meezingen van de naald.

Dreun bepaalt zich niet alleen tot de weergave van grammofoonplaten, een microfonische buis in een bandopnemer kan er oorzaak van zijn, dat de mechanische trillingen van motor en bandaandrijving wordt gemoduleerd op de muziek, hetzij bij de opname, hetzij bij het weergeven. Hoewel dit kan worden voorkomen is het niet juist aan te nemen, dat een bandopnemer niet door een dreunstoring kan worden gestoord, alleen omdat het een bandopnemer is. Alle andere bijgeluiden, behalve bandgeruis en naaldgeruis kunnen zowel bij platenspelers als bandopnemers optreden, hoewel het directe bijgeluid van het aandrijfmechanisme bij

bandopnemers het sterkste kan zijn. Geen fysioloog heeft tot nu toe verklaard hoe het komt dat mensen, die bezwaren maken tegen de geringste hoeveelheid dreun niet ontevreden zijn over de aanmerkelijk grotere hoeveelheid bijgeluid, dat door sommige bandaandrijfmechanismen wordt veroorzaakt.

Bijgeluiden en de uitwerking, die zij op menselijke wezens hebben zijn het onderwerp geweest van veel onderzoekingen, maar slechts weinige daarvan waren gericht op de hoorbaarheid bij lage intensiteitsniveaus. De aanwezigheid van een voortdurend achtergrond bijgeluid van gemiddelde of geringe sterkte wordt nauwelijks waargenomen, ten gevolge van een zekere vermoeidheid van de zenuwen van de toehoorders, veroorzaakt door hun voortdurende prikkeling. Extra bijgeluiden zullen gemakkelijker worden ontdekt, maar dan alleen als de vermeerdering boven de gehoordrempel ligt.

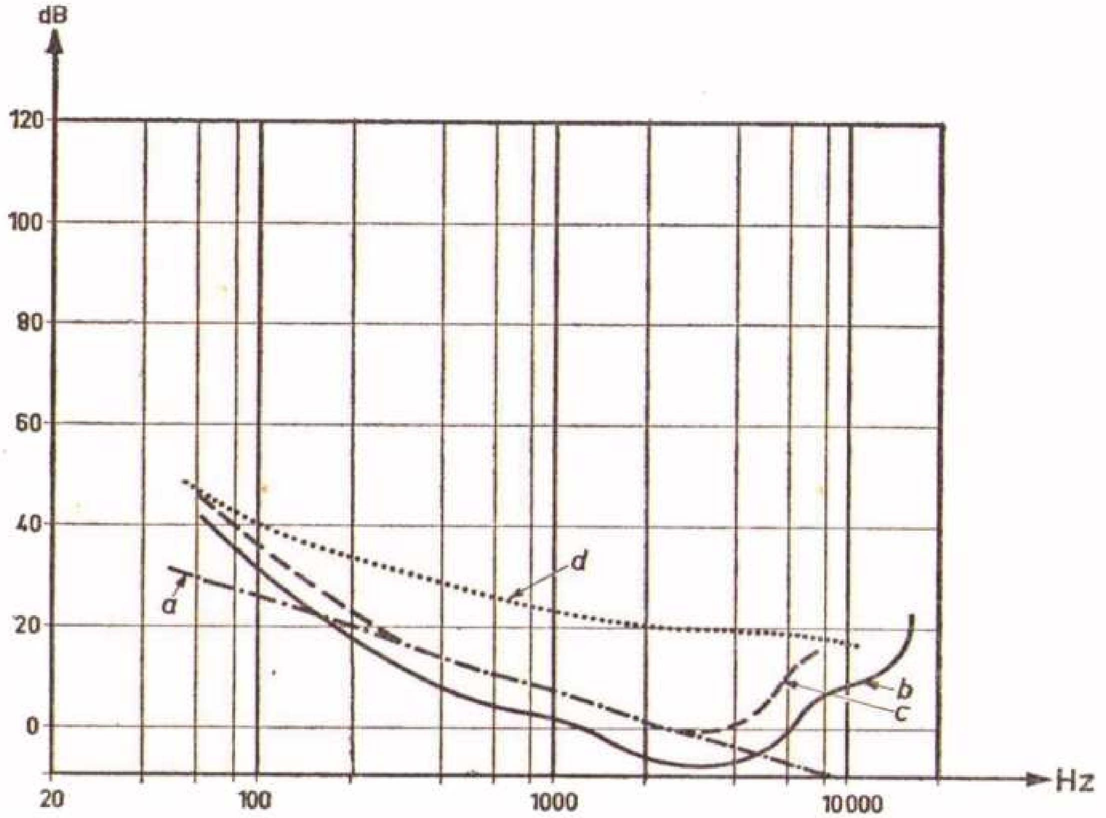


Fig. 36. Gehoordrempel.
a) Frequentiespectrum van de gemiddelde bijgeluiden in een kamer
b) Voor 1 % van de bevolking, bij afwezigheid van bijgeluiden
c) Voor 5 % van de bevolking, bij afwezigheid van bijgeluiden
d) Wanneer bijgeluiden a) optreden.

Deze gehoordrempel is niet voor iedereen dezelfde en ook niet onder alle omstandigheden gelijk. In fig. 36 geeft de getrokken lijn *b* wat we

zouden kunnen noemen de absolute gehoordrempel aan; slechts 1% van de mensen heeft een dergelijke lage drempel. De streeplijn *c* geeft de drempel aan voor 5% van de mensen. Dat wil zeggen, dat slechts 5% van de mensen nog geluiden beneden dit niveau kunnen horen. De aanwezigheid van bijgeluiden heeft echter een uitgesproken invloed op de gehoordrempel.

De maskerende werking van een continu geluidsspectrum is groter dan dat van een zuivere toon en het veroorzaakt een verschuiving van de drempel van 16-26 dB. De verschuiving van de drempel veroorzaakt door bijgeluiden is bepaald door Fletcher [30] en de lijn *d* in fig. 36 laat de gehoordrempel zien voor zuivere tonen als er bijgeluiden aanwezig zijn volgens de streep-punt lijn *A*.

Helaas zullen de ongewenste geluiden, die op de een of andere wijze door de elektro-akoestische installatie worden geproduceerd gewoonlijk geen zuivere tonen zijn. Brom kan een zuivere toon zijn of bestaan uit een grondtoon met enkele harmonischen. De andere bijgeluiden van de installatie, zoals dreun, bandgeruis enz. zullen een min of meer continu spectrum hebben en er is slechts zeer weinig bekend over het maskeereffect van het ene bijgeluid op het andere. Wij zullen daarom aannemen, dat de drempel voor de waarneming van homogene installatie bijgeluiden ligt midden tussen de absolute drempel *b* en het maskeerniveau voor zuivere tonen *d* in fig. 36.

Deze nieuwe drempel is getekend in fig. 38 *a* en *b*.
De weergave zal dus vrij zijn van homogene bijgeluiden als het niveau daarvan niet boven deze lijn uitkomt. Dreun is iets dat ligt tussen bijgeluiden met een homogeen frequentiespectrum en een afzonderlijk frequentiespectrum. Om tot een specificatie te komen van het toelaatbare dreun-niveau zullen we beide drempelkrommen gebruiken.

7-3. Brom en dreun

In het geval van brom zal het ongewenste signaal bestaan uit een toon van 50 Hz, vergezeld van harmonischen van 100 — 150 — 200 Hz enz. De eisen kunnen in dit geval worden berekend met behulp van lijn *d* in fig. 36. Om onhoorbaar te zijn moet de grondtoon van het bromsignaal 55 dB beneden het maximum uitgangsvermogen van de installatie blijven, de tweede harmonische ongeveer 60 dB en de derde en hogere har-

monischen ongeveer 65 dB beneden het maximum uitgangsvermogen.

Brom kan worden veroorzaakt door onvoldoende afvlakking in het voedingsapparaat, in dat geval zal de grondtoon meestal een frequentie hebben van twee maal die van de netfrequentie. De oorzaak kan ook zijn een onvoldoende afscherming in welk geval de grondtoon dezelfde frequentie zal hebben als de netfrequentie. Het is moeilijk te voorspellen welke vorm het spectrum van de brom zal aannemen. Wanneer we uitgaan van de redelijke veronderstelling dat de tweede harmonische 6 dB beneden de grondtoon zal liggen, de derde 9 dB beneden de grondtoon enz., dan zal het totale bromniveau ongeveer 57 dB beneden het maximum uitgangsvermogen liggen. Deze waarden slaan op de brom van de opname- en weergeefinstallaties tezamen beschouwd. Voor de weergeefinstallatie alleen zijn de eisen iets hoger en de signaal-bijgeluiden verhouding moet met 3 dB worden vermeerderd tot 60 dB, wat ook de minimum eis is voor de registratie-installatie.

We moeten bedenken, dat zelfs als we niet van de installatie verlangen, dat deze frequenties beneden de 100 Hz weergeeft en daardoor gemakkelijk vervorming kan veroorzaken bij lage frequenties, we moeten oppassen dat de brom geen intermodulatievervorming veroorzaakt en daardoor toch hoorbaar zal worden. Daarom mag de toelaatbare hoeveelheid brom nooit boven het 60 dB niveau uitkomen, zelfs niet in installaties met beperkte basweergave.

Dreun heeft een min of meer continu frequentiespectrum, dat zich meestal uitstrekt van beneden 25 Hz tot aan ongeveer 200 Hz. Het frequentiespectrum kan aanmerkelijk verschillen, afhankelijk van de draaisnelheid van de motor (2-polig, 4-polig of hysteresis) en van de eigenschappen van de overbrenging en de draaitafel. Het aantal kogels in de draaitafel lagers heeft b.v. een belangrijke invloed op het dreunspectrum.

In fig. 37 zijn twee kenmerkende spectra getekend:

a) van een platenspeler met een tweepolige motor

b) van een platenspeler met een vierpolige motor.

Om tot een specificatiewaarde te komen is in fig. 38a een kenmerkend dreunspectrum getekend naast de drempelkromme voor continu bijgeluid. Het is gebruikelijk het dreunniveau vast te leggen door het te vergelijken met de output van een groeftaster, waarmee een 100 Hz toon wordt afgetast, die is geregistreerd met een snelheidsamplitude van 1,4 cm/sec (effectieve snelheid 1 cm/sec).

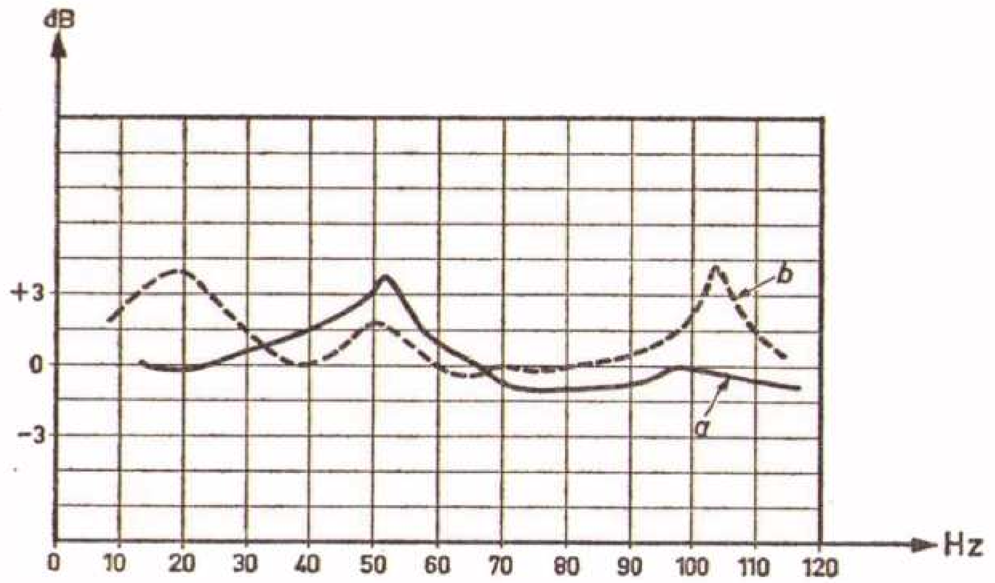


Fig. 37. Frequentiespectrums van dreun
a) van een platenspeler met een tweepolige motor
b) van een platenspeler met een vierpolige motor.

Dit ligt ongeveer 10 dB beneden het maximum opneemniveau. Om onhoorbaar te zijn moet de dreun ongeveer 60 dB beneden het maximum afgegeven vermogen van de installatie blijven en dus ca. 50 dB beneden het uitgangsvermogen, dat wordt verkregen met de 100 Hz vergelijkingsopname. Als we echter in aanmerking nemen dat in de meeste dreunspectra slechts enkele frequenties: en wel iets minder dan de halve netfrequentie (vierpolige motoren), de netfrequentie, anderhalf maal de netfrequentie (vierpolige motoren) en twee maal de netfrequentie (tweepolige motoren) van overwegend belang zijn, is het ook mogelijk kromme *D* van fig. 36 te gebruiken. Dan wordt de specificatiewaarde — 45 dB met betrekking tot 100 Hz geregistreerd met een snelheidsamplitude van 1,4 cm/sec. Naar aanleiding van luisterproeven met speciale opnamen met een zeer laag dreunniveau, geloven we dat deze laatste waarde volkomen aanvaardbaar is voor kritische luisteraars, zelfs in een stille omgeving. Wanneer we aannemen, dat het gedreun regelmatig verdeeld is over de opname en de weergeefinstallatie dan geldt voor beide de eis dat het dreunniveau niet boven — 48 dB mag uitkomen. De dreunwaarden, die hierboven zijn genoemd hebben alleen waarde als de weergave van de groeftaster zich uitstrekt tot frequenties beneden 25 Hz. Als dat niet het geval is, dan kunnen de waarden dubbelzinnig zijn. Als bijvoorbeeld resonantieverschijnselen in de arm van de groeftaster er de oorzaak van zijn, dat de output van de groeftaster bij lage frequenties zeer klein is, dan

zal de dreunwaarde zeer gunstig zijn, maar de dreun kan toch nog op de muziek worden gemoduleerd, waardoor de weergavekwaliteit achteruit gaat. De beproevingsvoorwaarden moeten, ook als geen weergave van de zeer lage frequenties wordt verlangd, zodanig zijn dat de dreun nauwkeurig wordt gemeten.

Een kenmerkend verschil tussen dreun en brom moet nog worden genoemd. Brom treedt op zolang als de weergeefinstallatie is ingeschakeld, dreun alleen als de draaitafel (of bandopnemer) loopt. De dreun zal dan worden gemaskeerd door het omgevingsbijgeluid en ook door de muziek, behalve gedurende de pauzen tussen twee gedeelten, vlak voor de muziek begint en direct na het einde. Tijdens pianissimo gedeelten vooral van gedeelten met uitsluitend hoge tonen, zal de maskerende werking ook gering zijn. Ten gevolge van de maskerende werking van de muziek kan de drempel voor het waarnemen van dreun naar boven worden verschoven wanneer men het niet erg vindt als er wat dreun optreedt voor de muziek begint. In het geval van muziek met fortissimo passages zal een ander verschijnsel de waarneming van dreun beïnvloeden. De gehoordrempel verschuift naar boven nadat de oren enige tijd zijn blootgesteld geweest aan een hard geluid. Een blank geluid van 100 dB, dat een minuut duurt veroorzaakt een tijdelijke verschuiving van 6 tot 12 dB, die nog enige minuten kan aanhouden nadat het geluid is uitgeschakeld.

De pauze tussen twee delen van een compositie duurt slechts enkele seconden en dus is het niet waarschijnlijk dat gedurende een onderbreking van de muziek dreun zal worden gehoord. Dit werd vrij kort geleden gedemonstreerd in een van onze laboratoria tijdens het spelen van een opname waarbij de muzikale registratie werd voorafgegaan en gevolgd door een ongemoduleerde passage, die enkele minuten duurde. Voor de muziek begon was enige dreun te horen, maar daarna was deze niet hoorbaar. Slechts in verbindingsgroeven waarvan de spoed groter is dan van muziekgroeven, kan zoiets als dreun worden gehoord, maar dat heeft niets te maken met de weergave installatie. Bovendien hangt het, omdat de muziek een zekere afleidende invloed uitoefent, van de luisteraar af of hij van de muziek zal worden afgeleid door nauwelijks hoorbare dreun of brom.

Voor zover het dreun betreft is de maskerende en afleidende invloed van de muziek zodanig, dat een vrij grote afwijking van de absolute grenswaarde eis, zoals deze is afgeleid op blz. 89, gewoonlijk toelaatbaar is. Een dreunniveau van — 35 tot — 38 dB is in de meeste gevallen aan-

vaardbaar, behalve in een zeer stille omgeving en in het geval van luisteraars, waarvan de volle aandacht misschien niet zozeer op de muziek dan wel op de installatie is geconcentreerd. Dreun en brom kunnen niet worden vergeleken met het tikken van een klok. Zij kunnen op zuiver fysische basis minder hoorbaar zijn dan de klok, toch zullen sommige mensen sterk gehinderd worden door zelfs de geringste hoeveelheid brom of dreun, maar zij zullen de klok, groot of klein, niet buiten de kamer zetten.

Aan de waarden, welke in deze en de vorige paragraaf zijn gegeven, is niet gemakkelijk te voldoen. Zelfs als deze kwaliteit kan worden bereikt kunnen dicht bij de luidspreker nog brom en dreun hoorbaar zijn. Op een dergelijke wijze naar onvolkomenheden te luisteren is nutteloos, behalve dan voor de ontwerper van de installatie. Het enige wat van belang is of er bijgeluiden worden gehoord op een normale afstand van de luidspreker en zonder dat de luisteraar daar speciaal op is geconcentreerd. Ten slotte wordt de lezer er aan herinnerd, dat de waarden voor theaters en concertzalen, die in tabel 12 zijn gegeven, werden bepaald terwijl deze leeg waren. Als een zaal vol mensen zit, die „stil" zijn, dan zal het niveau van de bijgeluiden hoger liggen en misschien zelfs hoger dan toelaatbaar zou zijn voor dreun en brom in huiskamers.

7-4. Achtergrondgeruis

De ruis van de versterker wordt veroorzaakt door de ruis, die in de buizen en weerstanden wordt opgewekt. In eerste instantie is deze ruis „blank", wat wil zeggen, dat iedere octaafband dezelfde hoeveelheid energie bevat of met andere woorden: de frequentiekarakteristiek is een rechte horizontale lijn. In werkelijkheid kan de ruis iets sterker zijn bij zeer lage frequenties.

Met de tegenwoordige transistoren en buizen van prima kwaliteit en de zeer stabiele weerstanden, is dit verschijnsel zeer zwak, behalve in het geval dat in een kritische trap van de schakeling koolweerstanden worden gebruikt, die een in verhouding grote gelijkstroom voeren. Het ruissignaal, dat in de buizen en weerstanden wordt opgewekt is zeer zwak en wordt pas hoorbaar na een aanmerkelijke versterking. Daarom kunnen alleen de ruis van de eerste versterkbuis en de eerste weerstand in de schakeling een hoorbaar signaal aan de uitgangsklemmen veroorzaken. Nu zijn er in verschillende elektro-akoestische installaties correctiefilters aangebracht.

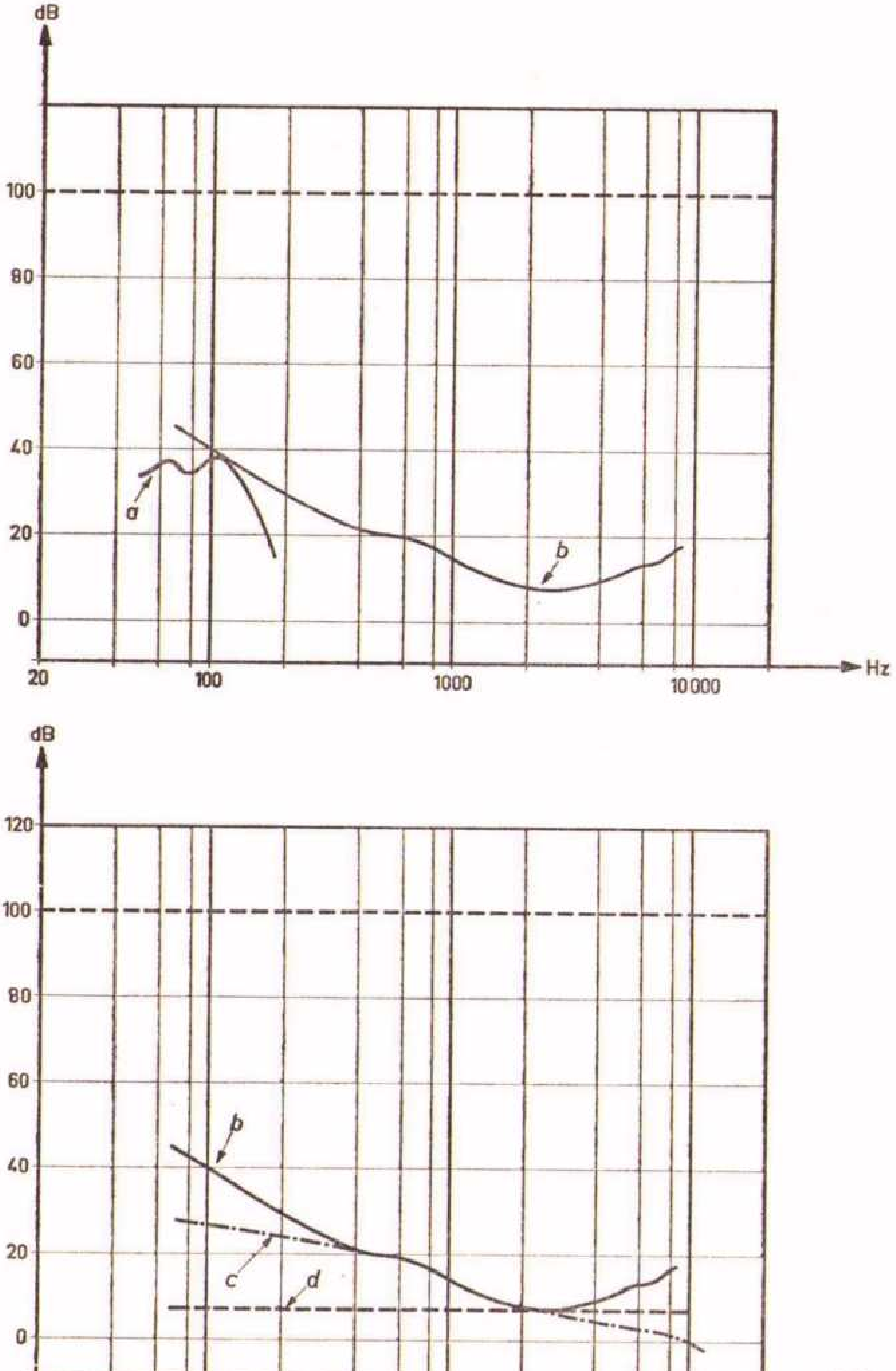


Fig. 38. Toelaatbare niveaus voor dreun en bijgeluiden.

a) Het dreunniveau vergeleken met de drempel voor bijgeluiden als 43 dB kamerbijgeluiden optreden

b) Gehoordrempel bij 43dB kamergeluiden

c) Ruis van afspeelversterker met ingebouwde compensatie

d) Ruis van een „rechte" versterker.

Dit zijn voornamelijk, behalve de tooncontroleschakelingen, de compensatie netwerken, die worden aangetroffen in bandopnemers en grammofoonversterkers. Zij dienen voor het herstellen van de juiste frequentiebalans van het geregistreerde signaal door in het algemeen de hogere frequenties ten opzichte van de lagere te versterken. Deze filters worden meestal aangetroffen achter de eerste versterkbuis of transistor en zullen dus van invloed zijn op de ruis. De frequentiekarakteristiek van de ruis aan de uitgangsklemmen zal dus identiek zijn aan die van het compensatie netwerk. De afspeelkarakteristieken voor grammofoonplaten en bandopnemers zijn ongeveer gelijk. In fig. 38 *c* is het nog juist niet hoorbare ruisspectrum aan de uitgang van een versterker met compensatienetwerk getekend naast de maskeerkromme voor continu bijgeluiden. Dit ruissignaal is ca. 46 dB sterker dan een enkele toon van 100 Hz van 0 dB. Daarom moet de ruis om onhoorbaar te zijn 100 — 46 = 54 dB blijven beneden het maximale uitgangsvermogen van een versterker. Bij deze ruis komt nog de versterkerruis, die in de opname aanwezig is. Deze ruis is een voorcompensatie en een na-compensatie netwerk gepasseerd en zal dus aan de uitgang een rechte frequentiekarakteristiek hebben. Dit ruissignaal moet 80 dB beneden het maximum uitgangsvermogen blijven om absoluut onhoorbaar te zijn. Het is dus buitengewoon belangrijk dat de opneeminstallatie een laag ruisniveau heeft. Daar in de praktijk de ruis, die afkomstig is van de opneeminstallatie en van de afspeelinstallatie tegelijkertijd optreden aan de uitgangsklemmen van de afspeelinstallatie zijn de eisen zelfs nog iets zwaarder en daarom is niet meer dan — 57 dB, of om aan de veilige kant te blijven — 60 dB toegestaan voor de weergeefversterker zelf. Bij directe versterking, dus niet door bemiddeling van een opname, moet het ruisniveau — 80 dB zijn.

Bestudering van fig. 38 *c* toont aan, dat als de versterkerruis toe neemt tot boven de waarnemingsdrempel, hij een beperkte bandbreedte zal hebben en, wanneer tenminste de ruis niet abnormaal groot is, voornamelijk hoorbaar zal zijn in een gebied dat loopt van ca. 1000 Hz tot ca. 3000 Hz. Een dergelijke vrij scherpe toon kan meestal worden gehoord, zelfs bij zeer goede installaties, als het oor zeer dicht bij de luidspreker wordt gebracht. Dit is echter van geen praktisch belang.

Voor naaldgeruis en bandgeruis gelden dezelfde eisen als voor thermische ruis, behalve dan natuurlijk dat deze in tegenstelling tot de ruis van de weergeefversterker slechts optreden wanneer wordt gedraaid en deze zullen meestal worden gemaskeerd door de muziek. Dit geldt ook

voor de ruis op het bandje of de grammofoonplaat, die afkomstig is van de opneemversterker. In het geval van bandopnamen kan de muziek begeleid zijn door gesis, dat toeneemt met toenemende modulatie van het bandje. Dit bijgeluid, dat door intermodulatie wordt veroorzaakt, wordt niet gemakkelijk door de muziek gemaskeerd. Het kan echter worden voorkomen en veroorzaakt tegenwoordig niet veel moeilijkheden meer, hoewel het enkele jaren geleden nog maar al te veel voorkwam.

Wij onthouden ons van het geven van getallen voor bijgeluiden van directe mechanische oorsprong, zoals meezingen van de naald, het geluid van de motor enz. De hoorbaarheid van deze bijgeluiden hangt voor een groot deel af van factoren buiten de installatie, zoals de akoestiek van de luisterruimte, de plaats van de installatie ten opzichte van de luisteraar en de eigenschappen van de kast, waarin de installatie is ondergebracht.

HOOFDSTUK VIII

STEREOFONIE

8-1. Algemene eisen

Stereofonie is meer dan de registratie en reproduktie van twee min of meer gelijke signalen door middel van twee min of meer identieke kanalen. Dit werd niet altijd begrepen. In het begin van het stereotijdperk werd het verband tussen de beide signalen maar al te dikwijls buiten beschouwing gelaten. Ook werd vergeten dat de meeste elektro-akoestische installaties worden gekocht voor het opnemen en reproduceren van muziek en niet van tafeltennisspelletjes of sneltreinen.

De voordelen van stereofonie voor het weergeven van muziek worden nu gewaardeerd en de technische eisen worden beter begrepen. Dat wil niet zeggen, dat we in 1963 al kunnen zeggen, dat de stereofonische registratie een vaste techniek is geworden, waarin weinig veranderingen kunnen worden verwacht. Feitelijk hebben de vijftien jaren, waarin audiotechniek mijn dagelijkse werk was en ook mijn hobby, mij geleerd, dat niets in de audiotechniek ooit vast is — en nog wel het allerminst als het dat wel lijkt te zijn.

Microfoontechniek aan de ene kant en de aanvaardbare grammofoonplaat aan de andere kant zijn nog steeds problemen, die nog veranderingen mee zullen brengen, die belangrijk zijn.

Bij de toenemende kennis van de psycho-akoestiek kunnen we verwachten, dat nog steeds veel veranderingen in de registratie en weergeeftechnieken zullen worden ingevoerd en dat enkele onzekerheden zullen worden verklaard. Dit zal echter geen verandering brengen in het feit, dat stereofonie een grote stap voorwaarts betekent in de richting van de natuurgetrouwe weergave en dat de meeste van de algemene eisen nu al wel kunnen worden vastgesteld.

Alvorens met een analyse van deze eisen verder te gaan is het waarschijnlijk van belang er op te wijzen dat, hoewel het woord stereofonie ons kan verleiden deze audiotechniek te vergelijken met de fotografische stereoscopische techniek, deze twee toch op vele belangrijke punten verschillen. Als we iets met een normale camera fotograferen dan zien we de

verschillende voorwerpen, die naast elkaar staan ook afzonderlijk. Niettegenstaande het vrijwel volkomen ontbreken van dieptewerking kunnen we toch ieder voorwerp duidelijk onderscheiden. In het geval van monofonische registratie is het praktisch onmogelijk een van de instrumenten werkelijk van de andere te scheiden. Op een foto kan mevrouw X haar man aanwijzen temidden van de tweede violen, maar bij een geluidsopname kan zij dat niet. Als een stereoscopische foto wordt gemaakt geeft elk van de beide foto's een vrijwel volledig beeld van het onderwerp. Als een stereofonische opname wordt gemaakt geeft elk van de twee registraties een min of meer onvolledig geluidsbeeld. Het is onmogelijk de beide beelden van een stereoscopische foto tot een enkel beeld te mengen zonder het samengestelde beeld tot onherkenbaar te verdoezelen. De twee deelopnamen van een stereo geluidsregistratie kunnen echter worden gemengd tot een monofonische opname van gelijke kwaliteit als een met opzet gemaakte mono-opname. Fouten in de stereocamera of stereokijker zullen onmiddellijk fouten ten gevolge hebben, die direct opvallen. Soortgelijke fouten in een stereo-installatie kunnen gemakkelijk ontsnappen aan de aandacht van luisteraars, die niet zo best op de hoogte zijn van de mogelijkheden van de stereofonie. Dit is natuurlijk geen excuus voor een slechte weergave.

Alvorens de speciale eisen te bespreken voor stereofonische weergave zullen die punten, die in de voorgaande hoofdstukken in het algemeen werden beschouwd, nu nog eens opnieuw worden bekeken.

In principe zou een stereoversterker in staat moeten zijn voor de betreffende ruimte een vermogen te leveren zoals dat aan de hand van fig. 11 kan worden bepaald. Dus zou ieder kanaal slechts de helft van dit vermogen behoeven te leveren. In werkelijkheid is wat meer aan te bevelen, want het is niet zeker dat de geluidsenergie regelmatig over het gehele orkest is verdeeld en het is zeer goed mogelijk, dat meer dan de helft van het totale vermogen door een van de twee kanalen moet worden weergegeven. Verder moeten we er rekening mee houden dat de ene helft van de kamer een grotere absorptiecoëfficiënt kan hebben dan de andere. De verstoring van de geluidsdistributie kan dan worden gecompenseerd met behulp van de balansinstelling maar het vermogen dat dan van een van de versterkers wordt verlangd neemt dan toe.

Daarom en in het bijzonder als de versterkers weinig reserve voor overbelasting hebben is het veilig het uitgangsvermogen van elk kanaal te vergroten tot b.v. 75% van het theoretisch vereiste totale vermogen.

Wanneer we een stereofonische installatie zouden beschouwen als te bestaan uit twee afzonderlijke installaties, dan zou het duidelijk zijn dat de eisen betreffende het ontbreken van vervorming precies dezelfde zijn als in het geval van monofonische weergave.

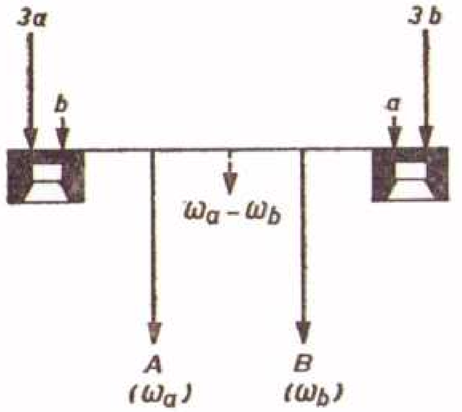


Fig. 39. De schijnbare plaats van de vervorming veroorzaakt door intermodulatie valt niet samen met dié van de tonen *A* en *B*.

Bij de stereo-opstelling kunnen echter de schijnbare plaatsen van de vervormingstonen anders zijn als van de tonen waarvan zij afstammen. Hieruit volgt, dat het maskeren niet hetzelfde zal zijn als in het geval van monofonische weergave. Dit is aangegeven in fig. 39. Hierin zijn met pijlen de schijnbare plaats en sterkte aangegeven van twee tonen *A* en *B*. De signalen toegevoerd aan de linker luidspreker zijn 3*a* en *b* en die, toegevoerd aan de rechter luidspreker *a* en 3*b*.

Ten gevolge van vervorming zal in ieder kanaal een interferentietoon ontstaan met een hoekfrequentie $\omega = \omega_a - \omega_b$ van gelijke intensiteit en faze. Hieruit volgt, dat de interferentietoon zal worden gehoord als komende van een punt midden tussen de beide luidsprekers. Hij zal dus niet evenveel worden gemaskeerd als het geval zou zijn bij monofonische weergave waarbij het zuivere geluid en de vervorming uit precies dezelfde richting komen. Hoewel een geval als in fig. 39 is getekend kan voorkomen, is het toch niet waarschijnlijk dat dit een geval is waarbij de versterkers het maximale vermogen moeten leveren. Gewoonlijk zullen bij een fortissimo passage de schijnbare geluidsbronnen min of meer regelmatig verdeeld zijn over de denkbeeldige lijn, die de twee luidsprekers verbindt. Daarom zal er weer maskering optreden van de vervorming, hoewel nu niet alleen door de klanken waartoe de afzonderlijke vervormingstonen behoren, maar ook door andere klanken. Het schijnt dus, dat de eisen betreffende vervorming ongeveer dezelfde zijn voor stereofonie als die voor monofonische weergave.

Hetzelfde kan worden gezegd met betrekking tot de frequentieweergave. Men kan vrezen, dat kleine verschillen tussen de weergavekrommen van de twee kanalen gemakkelijker kunnen worden ontdekt dan even grote afwijkingen in een monofonisch systeem, omdat vergelijking tussen het rechter en linker kanaal mogelijk is. De frequentiespectrums van de signalen opgenomen of gereproduceerd door deze twee kanalen zijn meestal echter voldoende verschillend om een dergelijke vergelijking onmogelijk te maken. Slechts in het geval dat een geluid wordt gereproduceerd dat afkomstig is van een punt op het midden van de denkbeeldige lijn, die de twee luidsprekers verbindt, wordt de situatie kritieker.

Nu werd door K. de Boer [31] aangetoond, dat een niveauverschil van 1 dB een verschuiving ten opzichte van het midden van de schijnbare geluidsbron oplevert van ongeveer 2 graden. Als de frequentieweergavekrommen van de twee kanalen zijn zoals in fig. 40 is aangegeven, dan zal een schijnbare geluidsbron van 2 graden ten gevolge van de verschillen tussen de beide krommen, 6 graden breed worden.

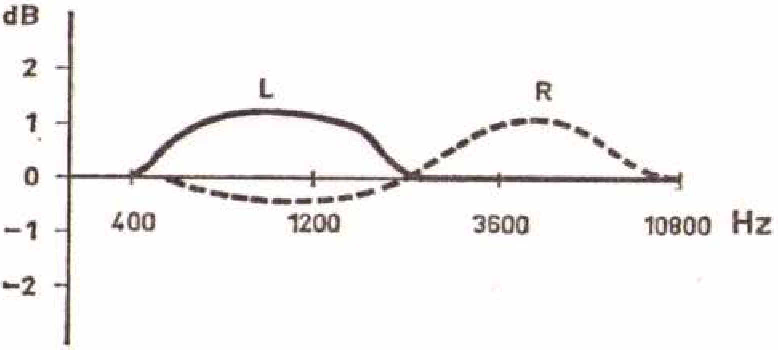


Fig. 40. Verschillen in de weergavekrommen van de *L* en *R* versterkers veroorzaken een verbreding van het stereofonische beeld.

Op een afstand van 3 meter van de schijnbare geluidsbron komt het daarop neer, dat diens doorsnede is toegenomen van 10 tot 30 cm. Het middelpunt van het geluid is in dit voorbeeld niet veranderd, maar het geluidsbeeld is minder duidelijk geworden. Dit gaat alleen helemaal op voor geluiden uit het midden, voor geluiden die komen van de rechter of linker hoek van het geluidsbeeld treden geen onderscheidingsverliezen op.

Opdat geen ernstige onderscheidingsverliezen in het midden van het geluidsbeeld zullen optreden moeten de weergavekarakteristieken van de beide kanalen aan elkaar gelijk zijn binnen 1 of 2 dB. In feite moeten deze onderscheidingsverliezen, die zijn te vergelijken met chromatische

fouten in optische lenzen, niet al te ernstig worden genomen, omdat zij niet zo gemakkelijk worden opgemerkt, vooral niet als de geluidsbron zelf vrij breed is, zoals bijvoorbeeld in het geval van een pianosolo of een uitvoering door een orkest. Verder zullen de nagalm, die reeds in de opname aanwezig is en de nagalm in de luisterruimte uw aandacht van dit verschijnsel afleiden. Wij tekenden met opzet de krommen van fig. 40 niet verder dan tot 400 Hz. Hoewel op dit punt geen volkomen overeenstemming bestaat wordt algemeen aangenomen dat het moeilijk is de richting te bepalen van zeer lage tonen. Volgens K. de Boer [31] kan geen richting worden bepaald voor zuivere tonen beneden de 400 Hz, behalve dan zeer ruw: voor, achter, opzij. Anderen stelden deze grensfrequentie een octaaf lager of hoger. Hieruit volgt dat afwijkingen in de weergavekarakteristiek beneden de 400 Hz het localiseren van de geluidsbron niet zullen beïnvloeden. De conclusie, dat slechts een kanaal al de lage frequenties behoeft weer te geven is voor de hand liggend, maar dit moet toch wel met enige voorzichtigheid worden benaderd. In de eerste plaats zal het nodig zijn, als de lage frequenties in het ene kanaal worden onderdrukt, ze in het andere kanaal extra te versterken, anders zal de totale weergave van het lage register slecht zijn. Dit kan, tussen twee haakjes, de prijs van het kanaal waarin de bassen voorkomen met haast net zoveel verhogen als op het andere kanaal wordt uitgespaard. Dit is vooral dan zo als fazecompensatie wordt toegepast (zie verderop). Een ander punt is, dat het zeer moeilijk is voor de beide kanalen gelijkheid in de weergave van het frequentiegebied te verkrijgen vlak boven de afsnijfrequentie van het beperkte kanaal. Ten derde, en dat is niet van belang, zal er een vrij belangrijk fazeverschuivingsverschil voor dat zelfde frequentiegebied tussen de beide versterkers optreden. Dat is de reden, waarom de resultaten van de Boer met zuivere tonen, niet mogen worden toegepast, behalve dan met zeer veel overleg, op het weergeven van muziek.

Door Donald S. McCoy [32] werden proeven genomen, waarbij luisteraars zaten op 3 meter afstand van het midden van de lijn, die de beide luidsprekers verbond, die op drie meter afstand van elkaar waren opgesteld. Aan de proefpersonen werd gevraagd de schijnbare verplaatsing of spreiding van de geluidsbron aan te geven wanneer met behulp van filters de weergave voor alle frequenties onder een zekere grensfrequentie niet-stereofonisch werd gemaakt. De resultaten zijn aangegeven in fig. 41. De spreiding van de geluidsbron is vrij groot als de fazefouten, die door

de filters worden veroorzaakt niet worden gecompenseerd, maar slechts 30 cm als fazecompensatie wordt toegepast en de afsnijfrequentie van het filter 300 Hz is. Hieruit volgt, dat het niet nodig is de lagere frequenties van de muziek stereofonisch weer te geven, maar dan moeten fazefouten worden voorkomen.

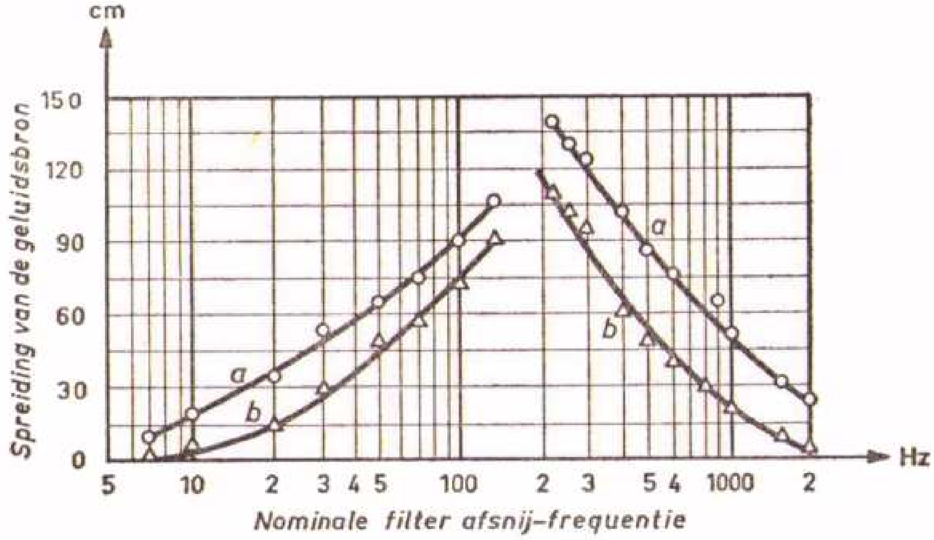


Fig. 41. De spreiding van de geluidsbron als alle signalen beneden of boven de aangegeven frequentie monofonisch worden weergegeven (door beide luidsprekers)
a) zonder fazecompensatie
b) met fazecompensatie.

Feitelijk slaan deze proeven niet direct op het onderwerp, dat nu wordt behandeld, omdat de lage frequenties in de niet-stereofonische instelling van de filters als een monofonisch signaal werden weergegeven en niet als een links of rechts signaal. Dit kan van invloed zijn op de uiteindelijke resultaten, maar deze invloed kan slechts klein zijn voor afsnijfrequenties, die niet boven de 400 Hz uitkomen.

In het geval van monofonische weergave worden fazeverschuivingen onder normale luisteromstandigheden niet waargenomen. De situatie is als het stereofonie betreft, ingewikkelder omdat de verschillen tussen de fazeverschuivingskarakteristieken van de twee kanalen invloed kunnen uitoefenen. Een van de oudste theorieën betreffende richtingshoren werd in 1907 opgesteld door Lord Raleigh. Hierin werd het fazeverschil van de geluidsgolven bij de beide oren verantwoordelijk gesteld voor de richtingsindruk. Later is bewezen, dat de fazehoek het richtingshoren niet verklaart.

De fazehoeken van de signalen hebben echter een zekere invloed op het geluid zoals het wordt waargenomen. Dit kan gemakkelijk worden

ingezien voor het geval, dat beide luidsprekers een signaal van dezelfde lage frequentie en amplitude weergeven. Als beide signalen in faze zijn zal een luisteraar, die zich op gelijke afstand van de beide luidsprekers bevindt, een geluid horen, waarvan hij niet precies de richting kan bepalen, omdat bij lage frequenties beide oren de onverzwakte linker en rechter signalen opvangen. Dat komt doordat de afmetingen van het hoofd zeer klein zijn in vergelijking met de golflengte van het geluid. Worden echter de verbindingen aan een van de luidsprekers omgewisseld, dan zullen de beide geluidsgolven in tegenfaze zijn, zodat niets zal worden gehoord. Dit is alleen maar waar zolang de golflengte van het geluid niet veel kleiner is dan de afstand van de luisteraar tot elk van de luidsprekers. Aan de andere kant zullen kleine verschillen in deze afstanden grotere fazefouten veroorzaken bij de oren van de luisteraar. Bovendien wordt bij hogere frequenties het signaal van de linker luidspreker sterker door het linker dan door het rechter oor gehoord. Bij frequenties beneden 400 Hz zal dus een fazeverschil van 180° het geluid volkomen te niet doen. Een fazeverschil van 90° zal 3 dB verlies in geluidssterkte veroorzaken en een fazeverschil van 45° zal een verlies van 1 dB veroorzaken. In samengestelde geluiden zullen dikwijls deeltonen voorkomen met een frequentie van minder dan 400 Hz.

Om een waarneembaar verlies van lage frequenties te voorkomen mag het fazeverschil tussen de twee kanalen niet boven de 45° uitkomen, tenminste voor lage frequenties, hoewel de invloed van fazefouten op de schijnbare luidheid niet geheel zal verdwijnen bij de wat hogere frequenties.

Voor de hogere frequenties zijn de fazehoeken van minder belang, maar toch niet helemaal te verwaarlozen. Wanneer een signaal onderworpen is aan een fazeverschuiving, dan wil dat in het algemeen zeggen, dat het over een tijd

$$t = \frac{\Phi}{360} \times T$$

wordt vertraagd, waarin Φ de fazehoek in graden is en T de tijd, die een periode van het signaal duurt.

De verschuiving van de schijnbare geluidsbron als twee identieke signalen worden toegevoerd aan twee luidsprekers, die 3 meter van elkaar staan, bedraagt 7 graden als een van de twee signalen 1 milliseconde is vertraagd ten opzichte van het andere. Dit is op zichzelf geen erg grote afwijking, maar zij wordt opgeteld bij andere afwijkingen zoals die, welke

worden veroorzaakt door verschillen tussen de twee weergavekarakteristieken. Het schijnt dus beter te zijn de toelaatbare vertragingstijd te beperken tot 0,5 milliseconden. Het geluid zal dan over 3,5 graad verschuiven of spreiden, dat is ongeveer 15 cm op een afstand van 3 meter. Met behulp van de hierboven aangehaalde formule kan dan het toelaatbare fazeverschil worden berekend. We vinden dan dat bij 1000 Hz een fazeverschil van 180° toelaatbaar zou zijn, bij 2000 Hz 360° en bij 3000 Hz 540°. Voor 500 Hz zou om deze reden dus slechts 90° fazeverschil toelaatbaar zijn.

Als de fazeverschuivingen in de elektro-akoestische installatie groot zijn kan niet gemakkelijk worden voorkomen dat de differentiële fazeverschuiving ook groot wordt. Het is daarom aan te bevelen dat de fazeverschuivingen in elk kanaal voor frequenties tot 400 Hz niet uitkomen boven de ca. 22 graden, ca. 45 graden voor frequenties van 400 tot 1000 Hz en ca. 90° voor frequenties boven de 1000 Hz.

Stereofonie eist dezelfde nauwkeurigheid van toonhoogte als monofonisch geluid. Theoretisch kunnen de jank- en fluttereisen lager zijn als de muziek met een hoofdtelefoon wordt beluisterd, maar praktisch is dat niet zo. Het gebruik van twee luidsprekers in plaats van een kan de verdeling van staande golven in de ruimte beïnvloeden, wat weer invloed op de hoorbaarheid van jank en zwevingen kan uitoefenen, maar de richting en de grootte van deze beïnvloeding kan niet worden voorspeld. Noch in het laboratorium, noch thuis konden we enig verschil ontdekken tussen mono en stereo voor wat betreft fouten in toonhoogte en jank of zwevingswaarnemingen.

Brom en dreun zullen door de kamerbijgeluiden worden gemaskeerd. Dit zijn geluiden met een zeer lage frequentie en dus nauwelijks gericht. Hieruit volgt, dat de toelaatbare brom en dreunniveaus in wezen gelijk blijven als het stereofonie betreft. Dat is niet zo voor de ruis. Als de versterkerruis hoorbaar is, zal deze eerst optreden in het frequentiegebied rond de 2000 Hz. In het geval van monofonische weergave zal deze ruis „toon" worden gehoord als komende rechtstreeks uit de luidspreker. Als het stereofonische weergave betreft zal de ruis schijnbaar komen van de gehele lijn, die de twee luidsprekers verbindt. Een dergelijke lijnvormige geluidsbron is minder hoorbaar dan een puntvormige en hieruit volgt, dat de ruiseisen voor stereo minder streng zijn dan voor mono. Daar de meeste installaties worden gebruikt voor beide soorten registratie of reproduktie worden de uiteindelijke eisen hierdoor niet beïnvloed.

8-2. Overspreken

De voorgaande paragraaf kan worden samengevat in de enkele zin, dat de meeste elektrische eisen gelijk zijn voor stereofonische en monaurale weergave. Enkele nieuwe eisen, zoals fazegelijkheid, zijn er echter aan toegevoegd. Andere eisen zijn, dat het overspreken tussen de beide kanalen niet te sterk mag zijn en dat de geluidsdistributie over de luisterruimte zodanig moet zijn, dat zuiver stereofonisch luisteren mogelijk is over een flink gedeelte van de ruimte en niet alleen op de „stereostoel".

Overspreken wil zeggen, dat signalen van het ene kanaal doordringen in het andere kanaal. Als het overspreken te sterk is zal dit verschuiving of spreiding van de schijnbare geluidsbronnen ten gevolge hebben.

Overspreken wordt meestal omschreven als de waarde, die aangeeft hoeveel het signaal dat in het andere signaal doordringt, zwakker is dan het signaal dat er de oorzaak van is. Dit schijnt een bevredigende wijze te zijn om dit verschijnsel te meten, bruikbaar voor alle doeleinden, maar helaas is dat niet zo. Als overspreken zou worden veroorzaakt door een weerstand, die het ene met het andere kanaal verbindt en beide kanalen zouden zich als zuivere weerstanden gedragen, dan zou het overspreeksignaal in faze zijn met het signaal waarvan het afkomstig is. In de praktijk echter is een dergelijk eenvoudig verband eerder een uitzondering dan regel. Overspreken kan worden veroorzaakt door elektrische of magnetische inductie of door mechanische koppelingen in de groeftaster. Hieruit volgt, dat iedere grootte van fazeverschuiving mogelijk is en dat de fazehoek van de ene tot de andere frequentie zal veranderen.

De invloed van overspreken zal worden nagegaan aan de hand van een paar voorbeelden. In het geval dat beide kanalen hetzelfde signaal voeren, zal de schijnbare geluidsbron precies midden tussen de beide luidsprekers liggen. De scheiding van de kanalen van links naar rechts is $p_{l,r}$ dB en van rechts naar links $p_{r,l}$ dB. Met een kanalenscheiding van $p_{l,r}$ dB bedoelen we dat het signaal op het linker-kanaal $p_{l,r}$ dB sterker is dan het overspreeksignaal op het rechter kanaal.

We kunnen nu verschillende gevallen onderscheiden:

*a*1) Beide overspreeksignalen zijn even groot en in faze met de hoofdsignalen, die eveneens worden verondersteld in faze te zijn. Dan zal de geluidsbron zich niet verplaatsen.

*b*1) Beide overspreeksignalen zijn even groot en in tegenfaze met de hoofdsignalen, die worden verondersteld in faze te zijn.
Er zal ook hier geen verschuiving optreden.

*a*2) Fazeverhouding als in *a*1, maar asymmetrisch overspreken, b.v. $p_{r,l} > p_{l,r}$
Dan is het totale linker signaal sterker dan het totale rechter signaal. Dit zal een verschuiving van het geluid veroorzaken t.o.v. het punt midden tussen de luidsprekers.

De verschuiving zal gemakkelijk kunnen worden berekend.
De verschillen tussen de links- en rechtsniveaus en de veroorzaakte verschuivingen van het geluid ten opzichte van het midden zijn als volgt:

$p_{l,r}$	$p_{r,l}$	niveau verschil	verschuiving
14 dB	20 dB	0,8 dB	1,6°
14 dB	26 dB	1,2 dB	2,4°
20 dB	26 dB	0,4 dB	0,8°
20 dB	38 dB	0,8 dB	1,6°

Daarom zal, vooropgesteld dat de kleinste scheidingswaarde niet minder is dan 20 dB, de verschuiving door in faze zijn de overspreken altijd te verwaarlozen klein zijn.

*b*2) In het geval, dat de overspreeksignalen beide in tegenfaze zijn met de hoofdsignalen is het weer niet belangrijk of het overspreken symmetrisch is of niet.

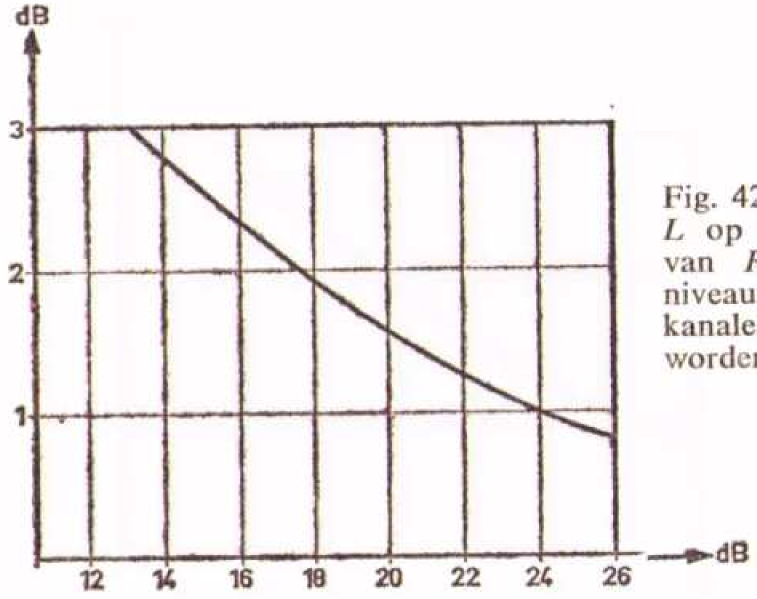


Fig. 42. In-faze-overspreken van *L* op *R* en uit-faze-overspreken van *R* op *L* veroorzaakt een niveauverschil tussen de twee kanalen als „midden" geluiden worden weergegeven.

*c*1) Een van de overspreeksignalen is in faze en het andere in tegenfaze met de hoofdsignalen, maar ze hebben dezelfde amplitude. De verschillen tussen de totale linker en rechter signalen die ontstaan door verschillende hoeveelheden overspreken in/uit faze, kunnen worden afgelezen uit fig. 42. Als de verschuiving van het geluid ongeveer 2 graden is voor elke dB niveauverschil, zal op 3 meter afstand van de luidsprekers het in/uit faze overspreken de volgende verschuiving van de virtuele geluidsbron t.o.v. het midden veroorzaken.

p	graden	cm
14	6	30
20	3,2	18
26	1,6	8

*c*2) In het voorgaande geval ondersteunden de twee overspreeksignalen elkaar voor zover het de verplaatsing van het geluid betreft. Als een van de twee scheidingswaarden groter is dan de andere (b.v. 18 dB in plaats van 14 dB) zal de verschuiving minder zijn dan de waarde, die in bovenstaande tabel voor de geringste scheidingswaarden wordt gevonden. Dus in het aangehaalde geval is de verschuiving kleiner dan 6 graden.

Het volgende dat we moeten doen is na te gaan wat er gebeurt met de geluiden, die niet precies uit het midden tussen de luidsprekers komen. Wij zullen eerst het geval beschouwen dat het linker signaal 10,4 dB sterker is dan het rechter signaal (fig. 43). Dan zal de virtuele geluidsbron

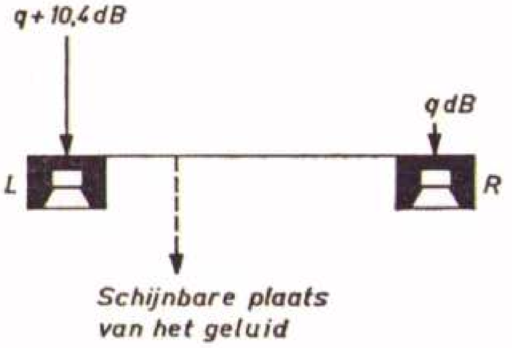


Fig. 43. De schijnbare plaats van het geluid als aan de ene luidspreker een signaal wordt toegevoerd, dat 10,4 dB sterker is dan dat van de andere luidspreker.

op een vierde van de afstand tussen *L* en *R* van *L* verwijderd liggen. Als de scheidingswaarden $p_{l,r}$ en $p_{r,l}$ beide 20 dB zijn en het overspreken in faze met de signalen is, dan zal dat een verplaatsing van het geluid naar rechts veroorzaken van ongeveer 4,8 graden.

In het geval dat het overspreken van een aan de signalen tegengestelde faze is zal de verschuiving naar links zijn en 6,8 graden bedragen.

Als het overspreken — 26 dB bedraagt, zullen de verschuivingen respectievelijk 2,4 en 3,2 graden worden. Het overspreken van het kanaal, dat het zwakste van de beide signalen draagt, op het andere kanaal heeft veel minder invloed dan het andere overspreken en daarom behoeft het geval, dat het ene overspreeksignaal in tegenfaze is met het andere niet te worden onderzocht.

Voor signalen, die door slechts een kanaal worden gedragen en die dus zonder overspreken door slechts een van de luidsprekers zouden worden weergegeven liet de enige gepubliceerde informatie, die we konden vinden, alleen maar een berekening toe voor een overspreken van 14 dB. In dat geval bedraagt de verschuiving van de geluidsbron 3 graden naar de luidspreker toe, die stil moest zijn, of er van af. Hieruit volgt, dat het meest kritische geval dat is, waarbij een geluid wordt voortgebracht dat moet worden gehoord als komende van een punt op ca. een vierde van de afstand tussen de luidsprekers. In dat geval zal, als het overspreken in tegenfaze is met de signalen of met het zwakste van de twee, de verschuiving van de schijnbare geluidsbron 6,8 graden bedragen als het overspreken — 20 dB is en en 3,2 graden bij een overspreken van — 26 dB. Voor een luisteraar op 3 meter afstand van de luidsprekers is de verschuiving ongeveer 33 cm respectievelijk 16 cm.

Onder laboratoriumcondities is de kleinste waarneembare hoek ongeveer 2 graden voor geluiden, die worden voortgebracht vóór de luisteraars en daaruit volgt dat het wenselijk blijkt te zijn dat het overspreken beter is dan — 26 dB. Dan zal de juiste vaststelling van de plaats van een geluidsbron mogelijk zijn, hoewel het natuurlijk de vraag is of het heel erg is als de pianist wordt gehoord op een plaats die ca. 30 cm ligt naast het punt waar hij zou moeten zijn. Dit kan alleen maar de mensen hinderen, die van plan zijn op de pianist te schieten!

Er is echter een andere overweging. Overspreken zal dikwijls frequentieafhankelijk zijn zowel in amplitude als in faze en dus kunnen, als een samengesteld geluid wordt weergegeven, enkele van de deeltonen tot de luisteraar komen uit een andere richting dan de grondtoon en de overblijvende deeltonen. Dit veroorzaakt verlies aan scheiding en spreiding van de geluidsbron. Wij zijn van mening, dat tegen een schijnbare geluidsbron met een breedte van 30 centimeter geen bezwaar zal worden gemaakt, zelfs niet als zo'n klein instrument als de piccolo wordt weergegeven en

we betwijfelen zelfs dat het zal worden opgemerkt dat de geluidsbron 50 cm breed is als er geen zichtbare aanwijzing is. Daarom gaan we er van uit dat — 20 dB een volkomen bevredigende waarde is voor overspreken, wanneer het de weergave betreft van solomuziek of kleine ensembles.

Voor orkestmuziek kan misschien een iets betere waarde wenselijk zijn. Dit voert ons tot het wezen van stereö. De enige geluidstechnische reden voor stereo is, of moet zijn, dat het beter klinkt en niet de sensatie, dat we kunnen horen dat de harp aan de linkerzijde van het orkest zit. Een werkelijk voordeel is, dat in verhouding zwakke solo-instrumenten tijdens de opname niet extra behoeven te worden opgehaald om te voorkomen dat ze onhoorbaar worden door het begeleidende orkest.

In de concertzaal horen we het orkest binnen een hoek van ongeveer 60 graden. Als de minimum hoorbare hoek 2 graden is, dan kunnen we ruwweg geschat drie instrumenten tegelijk horen uit één richting en ongeveer 90 andere instrumenten horen we dan uit andere richtingen. Bij ons thuis zal de luisterhoek ook ongeveer 60 graden zijn en als het overspreken zodanig is, dat in het ongunstigste geval een spreiding van 6 graden kan optreden, dan kunnen we binnen deze 6 graden ongeveer 9 instrumenten horen. Dit geldt voor geluid, dat niet in het midden wordt voortgebracht. De spreiding voor klanken, die uit het midden komen zal, als het overspreken — 20 dB bedraagt en in/uit faze is, ongeveer 3 graden bedragen, wat nauwelijks meer is dan de kleinste hoorbare hoek. Dus solisten, die gewoonlijk worden opgenomen in of vlak bij het midden zullen nauwelijks met iets meer maskering door de andere instrumenten worden gehoord dan in de concertzaal het geval is.

Behalve het maskeren van het ene geluid door het andere is er nog een ander verschijnsel, dat helaas de kwaliteit van de monofonische weergave beïnvloedt. We noemen dit „vervorming door verwisseling van harmonischen" of „compressievervorming".

Tijdens een orkestuitvoering zullen verschillende instrumenten gedurende het grootste deel van de tijd samenspelen. Bij stereofonische weergave zullen deze instrumenten ruimtelijk gescheiden worden gehoord, maar bij monofonische weergave zullen alle geluiden uit een punt komen. Om na te gaan welke uitwerking dit op de subjectieve kwaliteit kan hebben, zullen we uitgaan van het geval dat een trompet en een viool tegelijk worden weergegeven. Voor ons doel nemen we aan, dat deze twee instrumenten de strijk- en blaasinstrumenten vertegenwoordigen. Deze

groepen uit het orkest hebben namelijk een vergelijkbaar vermogen. In fig. 44 zijn de geluidsspectrums gegeven van een viool, bespeeld op de losse A-snaar en van een trompet [33]. Bij stereofonische weergave behoeft geen rekening te worden gehouden met het versmelten van de verschillende harmonischen, maar als beide geluiden door een enkele luidspreker

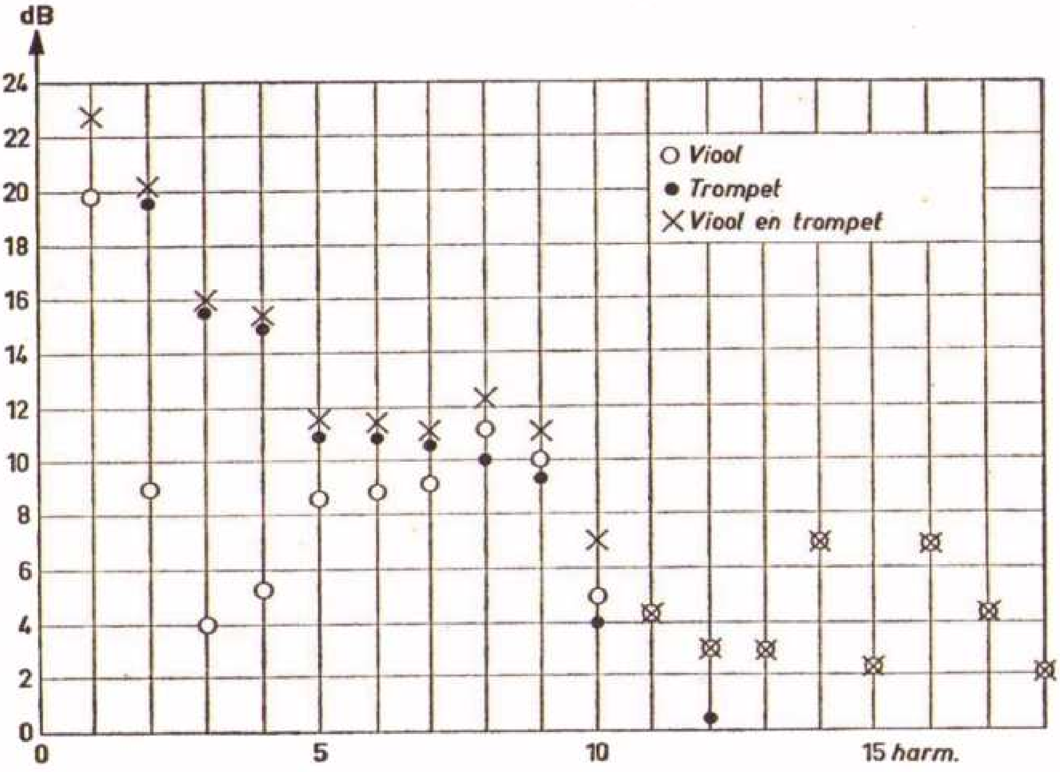


Fig. 44. De invloed van compressievervorming op het akoestische spectrum
○ viool • trompet x viool en trompet samen.

worden weergegeven, dan zal het samengestelde geluid een geluidsspectrum vertonen, dat verschilt van dat van zowel de viool als de trompet. Ook dit is in fig. 44 weergegeven. Hier is uitgegaan van de veronderstelling, dat de overeenkomstige harmonischen van beide instrumenten met elkaar in faze zijn.

Het resulterende geluid is zodanig, dat de lagere harmonischen voornamelijk die van de trompet zijn en de hogere harmonischen die van de viool. Hieruit volgt, dat een geluid wordt waargenomen, dat hoewel het een zekere gelijkenis vertoont met elk van deze instrumenten, in feite geen van beide is en het zal ook een agressiever en ruwer samenstelling hebben dan de individuele geluiden.

Dit wordt nader getoond in fig. 45, van ref. [34], dat de opbouw aangeeft van de grondtoon en de eerste vier harmonischen van een toon van

een trompet en een viool en het gecombineerde geluid gedurende de eerste 150 milliseconden van de toon.

Deze figuur laat ook weer zien dat het karakter van de samengestelde toon sterk wordt beïnvloed door de lagere harmonischen en wel speciaal

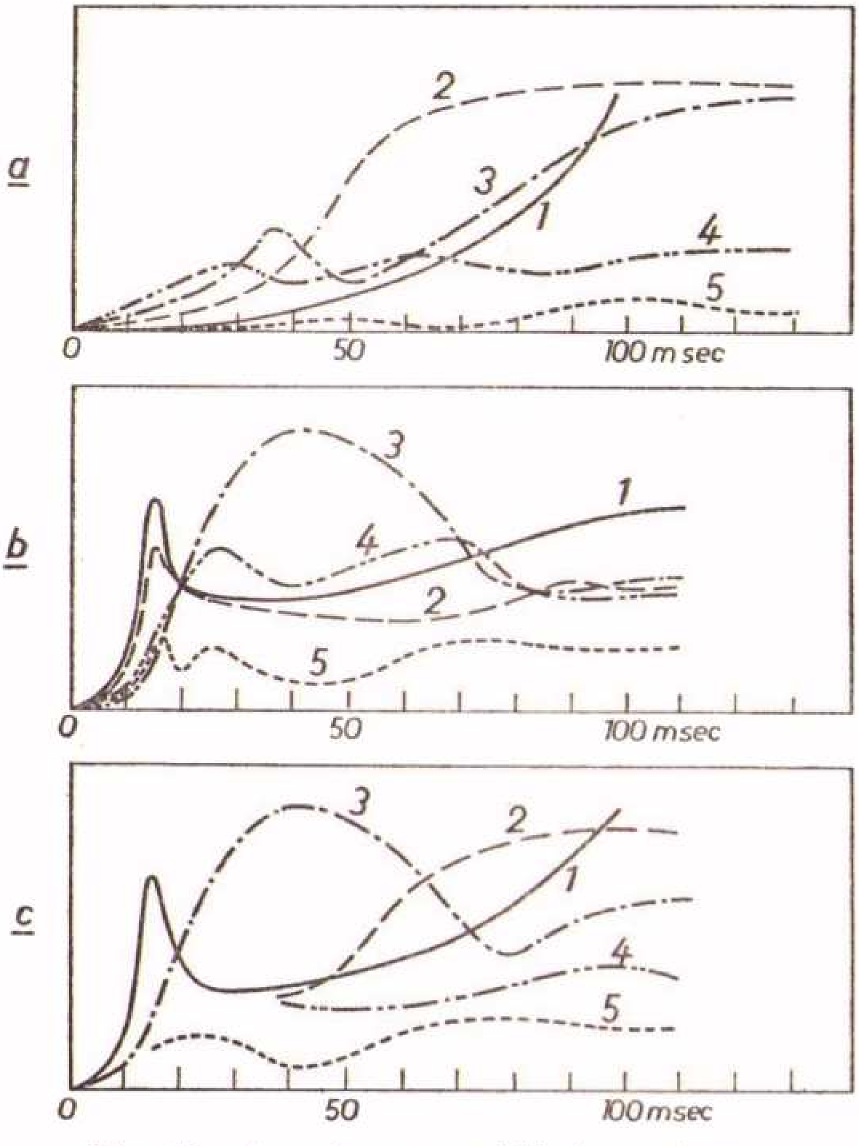


Fig. 45. Aanzet van muziekinstrumenten
a) viool
b) trompet
c) viool en trompet samen
De getallen geven de harmonischen aan.

door de derde harmonische van de trompettoon. Hieruit volgt, dat de aanzet van de toon voornamelijk zal overeenkomen met die van de trompet. Het vervolg zal het gemengde karakter dragen, dat in fig. 44 is weergegeven. Beschouwen we iedere toon op zichzelf, dan zal deze veranderd zijn op een wijze alsof een vrij grote hoeveelheid intermodulatie-achtige

vervorming of interferentievervorming optreedt. Wij hebben getracht dit feit in fig. 46 te illustreren, waarin de woorden „violin" en „trumpet" op een zodanige wijze zijn gedrukt, dat zij zeer dicht de respectievelijke

Fig. 46. Visuele voorstelling van de uitwerking van compressie.

diagrammen benaderen en waarin ook de woorden over elkaar zijn gedrukt als een parallel voor de monofonische weergave en waarbij de totale indruk er een is van intermodulatie, die het karakter van de individuele instrumenten wegneemt en daarvoor in de plaats een vrij vreemd vervangend instrument, de „Troulin", oplevert.

Wanneer we een groep violen, die door een enkele luidspreker worden weergegeven beluisteren, kan herhaaldelijk worden opgemerkt dat de subjectieve klankkwaliteit minder is dan van een vioolsolo, zelfs als de gewone vervormingsoorzaken buiten beschouwing kunnen worden gelaten.

Men neemt aan, dat dit verschijnsel dus kan worden verklaard door een verwisseling van de harmonischen, hoewel soms van een wat ingewikkelder aard dan in het vorige geval. Soortgelijke waarnemingen kunnen worden gedaan bij koormuziek. Hoewel het niet altijd wordt gerealiseerd, zijn noch de menselijke stem noch de snaarinstrumenten zonder vibrato en dit

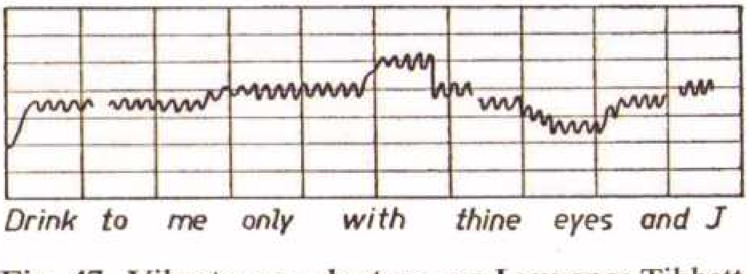


Fig. 47. Vibrato van de stem van Lawrence Tibbett
1 vertikale verdeling = 1 halve toon
1 horizontale verdeling = 1 seconde.

vibrato heeft zelfs een vrij grote amplitude. Bij goede zangers bedraagt het vibrato wel ongeveer een halve toon met een frequentie van ongeveer 6 Hz (fig. 47). Bij violen is de vibrato-frequentie ongeveer dezelfde, maar de grootte van het vibrato is een kwart toon [35]. Populair technisch uitgedrukt vertoont de menselijke stem een „jank" van ca. 6% top tot top en de viool van 3 % top tot top, beide met een frequentie van 6 Hz. Dit is een verassend hoge waarde, maar schijnt toch het menselijke gehoor volledig voldoening te geven, hoewel gewone „jank" met een dergelijke amplitude en frequentie zeer onaangenaam zou aandoen.

Als een aantal snaarinstrumenten of menselijke stemmen tezamen klinken zal de samenklank niet volmaakt zijn, maar goed genoeg voor alle praktisch voorkomende gevallen. Er zullen kleine verschillen in toonhoogte zijn, kleine verschillen in het moment van het inzetten van de toon, verschillen in de amplitude en de frequentie van het vibrato zowel als verschillen in het timbre van de verschillende instrumenten. Als dat niet zo zou zijn, dan zou het kooreffect, dat vooral afhangt van de variatie in het ogenblik van de inzet en de toonhoogteverschillen, verloren gaan [36]. De luisteraar naar een groep van, laten we zeggen 24 violen, zal dus op een zeker ogenblik 24 grondtonen en 24 stellen harmonischen horen, die nominaal allemaal identiek zijn, maar die in werkelijkheid onderling en voortdurend variëren. Weer zullen de grondtonen en harmonischen die het luidste zijn op het punt van waarneming, overheersen, hoewel zij niet van een en hetzelfde instrument afkomstig behoeven te zijn. Het is dus mogelijk in het geval van monofonische weergave de samengestelde klank voor te stellen als bestaande uit een grondtoon met een aantal boventonen, die niet in een zuiver harmonisch verband staan tot die grondtoon, maar die iets van de juiste waarde afwijken en waarvan de afwijkingen niet constant zijn maar met de tijd misschien een verdeling zullen hebben rondom de juiste waarde. Het is niet gemakkelijk een directe elektro-mechanische overeenkomst of voorbeeld voor deze situatie te vinden, maar misschien is de invloed van dit verschijnsel te vergelijken met die van flutter, die meestal niet als frequentiemodulatie worden herkend, maar als een soort vervorming, die de toon min of meer „rammelend" maakt. De „flutterfrequenties" van de lagere harmonischen kunnen nog aanvaardbaar zijn, maar voor de hogere frequenties zullen zij 6 tot 10 maal zo snel zijn en daarom onaangenaam. Tezamen kunnen zij zo iets opleveren als de modulatiebijgeluiden van een bandopnemer.

Deze hypothese, die tot nu toe elke wetenschappelijke ondergrond

mist, hebben we voor zover dat mogelijk is getracht proefondervindelijk te bewijzen.

Er werd een aantal luisterproeven genomen, waarbij gebruik werd gemaakt van normale stereofonische handelsgrammofoonplaten, stereofonische bandjes van 19 en 76 cm per sec., pseudo-stereofonische bandopnamen, enkel-kanaal grammofoonplaten, enkel-kanaal bandopnamen uit de handel en enkel-kanaal studio bandopnamen. Alle enkel-kanaalopnamen werden weergegeven door een luidspreker, de pseudo-stereofonische en alle stereofonische opnamen werden stereofonisch gespeeld, enkel-kanaal over één luidsprekersysteem, enkel-kanaal over twee luidsprekersystemen (pseudo-stereofonisch), linker-kanaal alleen en rechter-kanaal alleen. De soorten muziek waren orkest en enkele vocaal. Het verschijnsel, dat hierboven werd beschreven kon tijdens deze proeven worden herkend met een uitgesproken verschil in hoeveelheid schijnbare vervorming tussen stereofonische en niet-stereofonische weergave. Enkele stereofonische grammofoonplaten met een in vergelijking grote niet-lineaire vervorming gaven zelfs de indruk minder vervormd te zijn dan monofonische opnamen met minder eigen vervorming. De resultaten van deze proeven werden bevestigd door het monauraal luisteren naar stereofonische weergave, dat wil zeggen met een oor dichtgehouden. Op het moment dat het oor wordt afgesloten schijnt de vervorming aanmerkelijk toe te nemen. Tijdens een „echt" concert kon soms een vervorming zoals hierboven beschreven, worden gehoord als de alt en de bas tegelijk zongen als zij zeer dicht bij elkaar stonden. Deze vervorming werd nooit waargenomen als de artiest alleen zong of als de hoek tussen de beide zangers en het punt waarop zich de toehoorder bevond, gelijk of meer was dan 3 graden.

Wij kunnen geen kwantitatieve analyse geven van wat wij noemden compressie vervorming en kunnen dus ook niet vaststellen hoeveel verschuiving of spreiding van de geluidsbeeldelementen toelaatbaar is alvorens het stereofonische geluid zodanig is gedegenereerd dat compressie vervorming weer waarneembaar wordt. De subjectieve kwaliteit van pseudostereofonie lag ongeveer midden tussen die van monofonische en echte stereofonische weergave in. Hieruit volgt, dat de compressie vervorming ongeveer dezelfde eisen stelt aan overspreken als de hoorbaarheid van de solist tegen een orkest als achtergrond.

Daarom schijnt een overspreken van — 20 dB aanvaardbaar te zijn, hoewel — 26 dB wenselijker kan zijn. Dit wordt bevestigd door proeven die zijn genomen door Harvey en Schroeder [37], waarvan de resultaten in

fig. 48 zijn verzameld. Zij werkten samen met kritische waarnemers, die „bedreven waren in de kunst geluiden te localiseren, hetzij door hun werkzaamheid op dit gebied hetzij door opleiding voor de proeven". Bij een kanalenscheiding van 21 dB konden slechts 20% van deze proefpersonen het verschil horen bij vergelijking met stereofonie met — 50 dB overspreken. Bovendien werd de ruimtelijke overeenkomst door alle luisteraars als goed beoordeeld. In feite toonde geen van de waarnemers enige voorkeur voor een kanalenscheiding, die beter was dan 21 dB.

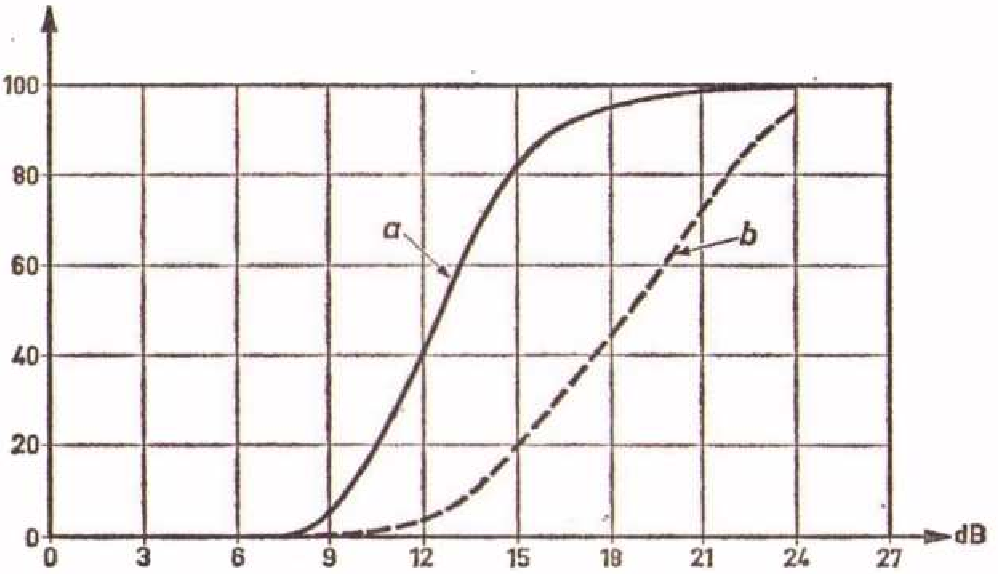


Fig. 48. De invloed van overspreken op de waardering van stereofonische weergave.
a) Percentage luisteraars dat oordeelde dat de ruimtelijke overeenstemming goed was bij de scheidingsgetallen, die op de absis zijn aangegeven, vergeleken met stereo met minder dan -50 dB overspreken.
b) Percentage luisteraars dat geen enkel verschil kon ontdekken.

Het is niet nodig dezelfde kanalenscheiding aan te houden voor het gehele hoorbare frequentiegebied. Zoals reeds werd opgemerkt is bij lage frequenties het vermogen van ons gehoororgaan richting te bepalen zeer gering, hetzelfde is het geval bij hoge frequenties, b.v. boven 5000 Hz, waarbij de golflengte van het geluid klein wordt in vergelijking met de afmetingen van het hoofd. Dus aan de uiterste grenzen van het frequentiegebied kan sterker overspreken worden toegelaten.

Door Donald McCoy [32] en ook door Harvey en Schroeder werden proeven genomen, die erop wezen, dat voor frequenties beneden 200 Hz en boven ongeveer 10.000 Hz (fig. 41) de kanalenscheiding 0 dB kan zijn (dus in het geheel geen scheiding). Andere proeven genomen door Franssen

[38] toonden aan, dat als speciale voorzieningen worden getroffen (toevoeging van een vertraagd signaal), ongeoefende luisteraars niet het verschil kunnen horen tussen werkelijke stereo en stereo waarbij de frequenties onder de 1000 Hz monofonisch werden weergegeven, maar geoefende luisteraars kunnen dat wel.

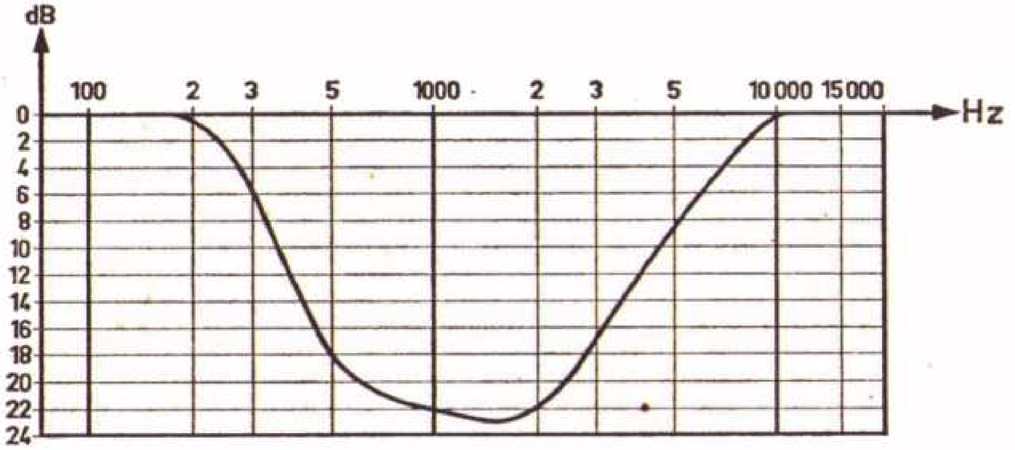


Fig. 49 De gewenste kanalenscheiding die geen hoorbare vermindering van de stereofonische kwaliteit zal veroorzaken.

Uit deze resultaten is fig. 49 afgeleid. Hierin zien we hoeveel overspreken kan worden toegelaten bij verschillende frequenties.

8-3. Over de juiste zitplaats bij stereo („stereostoel")

Twee kanalen stereofonie is niet hetzelfde als werkelijk geluid, maar het geeft een overeenkomstig geluidsbeeld en zelfs een vrijwel identiek beeld als alle voorwaarden goed zijn. Het verschil tussen deze twee treedt naar voren als een luisteraar staat tegenover een geluidsbron, die schijnt te liggen midden tussen de twee luidsprekers en zich dan uit zijn centrale plaats een meter naar links of rechts verplaatst. (fig. 50).

Verplaatst hij zich bijvoorbeeld van 1_m naar 1_l dan komt hij dichter bij luidspreker *L* en beweegt zich van luidspreker *R* af.

Het gevolg hiervan is, dat het geluid van luidspreker *L* luider zal worden en eerder de luisteraar bereikt dan het geluid van luidspreker *R*.

Door de verschillen in luidheid en in tijd zal het virtuele geluid naar links bewegen. Buiten het midden tracht het geluidsbeeld zich naar de dichtsbijzijnde luidspreker te verplaatsen (naar links in bovenstaand voorbeeld) en dan zullen alleen de zuiver van rechts komende geluiden hoor-

baar door de rechter luidspreker worden weergegeven. Zonder speciale voorzorgsmaatregelen zal de luisteraar, die de „stereostoel" verlaat worden gestraft met „het gat in het midden".

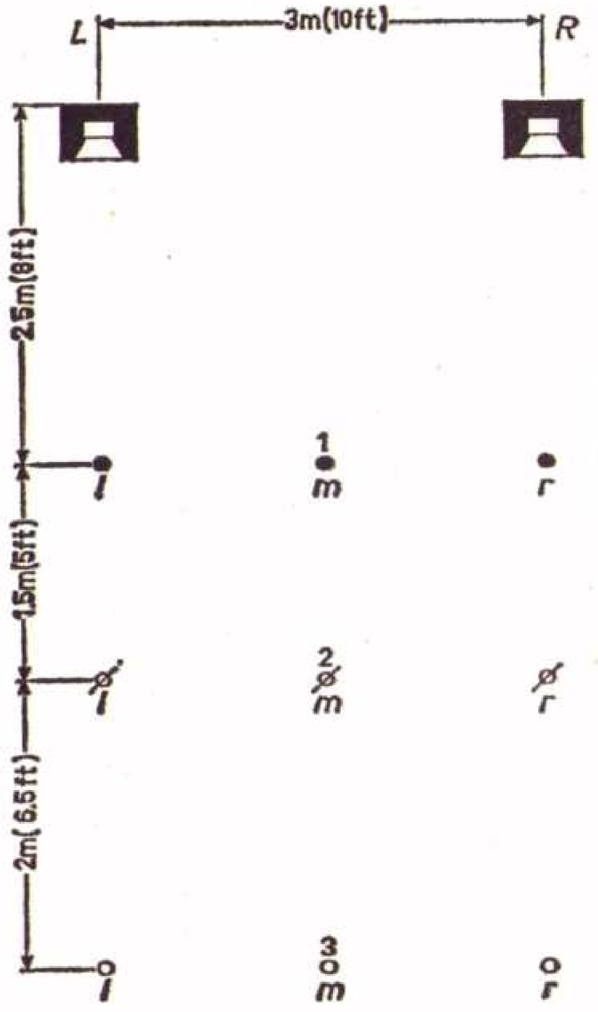


Fig. 50. Verschillende plaatsen in een kamer waarvoor de gewenste door de luidsprekers *L* en *R* veroorzaakte geluidsdrukken zijn berekend teneinde niet gebonden te zijn aan de "stereostoel".

De maatregel, die moet worden genomen is dat de luidspreker het juiste polaire diagram moet hebben. Om er voor te zorgen dat de luisteraar in het punt 1_l dezelfde richtingsindrukken krijgt als de luisteraar in 1_m moet de luidspreker *L* minder energie in de richting 1_l uitstralen dan in de richting 1_m en de luidspreker *R* moet meer energie uitstralen in de richting 1_l dan in de richting 1_m. Met twee factoren moet nog worden rekening gehouden. De eerste is, dat de intensiteit van het directe geluid omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen de geluidsbron en de luisteraar.

De tweede is, dat de tijd, die het geluid nodig heeft om van de geluidsbron bij de luisteraar te komen, evenredig is met deze afstand. Franssen [38] publiceerde een kromme, die in fig. 51 is weergegeven, die

de invloed laat zien van tijdsverschillen en intensiteitsverschillen tussen twee luidsprekers op de stereofonische richtingsbepaling. Als bijvoorbeeld het geluid van de linker luidspreker de luisteraar 1 milliseconde eerder bereikt dan dat van de rechter luidspreker, dan zal dit de richtingsbepaling niet beïnvloeden als het geluid van de rechter luidspreker door de luisteraar

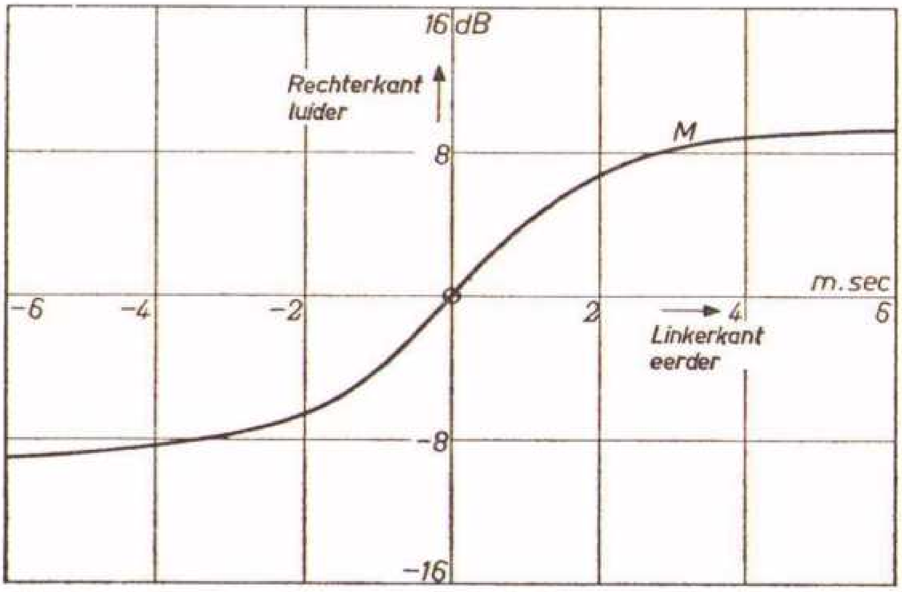


Fig. 51. Invloed van tijdsverschillen en intensiteitsverschillen tussen twee luidsprekers op de stereofonische bepaling van de richting.
a) rechterkant luider
b) linkerkant eerder.

4 dB sterker wordt gehoord. Voor ieder punt in de kamer kan het verschil in looptijd worden berekend uit de afstand tussen de luidsprekers en dat punt. Met behulp van fig. 51 kunnen we uitrekenen hoeveel luider of zachter de linker luidspreker moet worden gehoord opdat de richtingsbepaling niet door het tijdsverschil wordt beïnvloed. Hieruit kan het gewenste polaire diagram van de luidspreker worden berekend. Wij hebben dit gedaan en de resultaten uitgezet in fig. 52. We zien, dat de meeste punten dicht bij de met een streeplijn getekende cirkel liggen.

Daarom moet het polaire diagram enkelzijdig cirkelvormig zijn. De geluidsdruk zal echter in punt 1_m groter zijn dan berekend. Daar dit een punt is, dat even ver van de twee luidsprekers af ligt, zal dit de richtingsbepaling niet beïnvloeden.

In een kamer zal het gereflecteerde geluid een vrij grote intensiteit hebben, maar het heeft, zoals in het volgende hoofdstuk zal worden aan-

getoond, slechts weinig invloed op de richtingsbepaling en wel omdat het later wordt gehoord dan het directe geluid.

Hieruit volgt, dat een voorwaarde voor goede stereofonische weergave is, dat de luidsprekers een enkelzijdig cirkelvormig stralingsdiagram moeten hebben. In ons voorbeeld maken de assen van de luidsprekers een hoek van slechts 20 graden met de korte muur van de kamer. Als de afstand

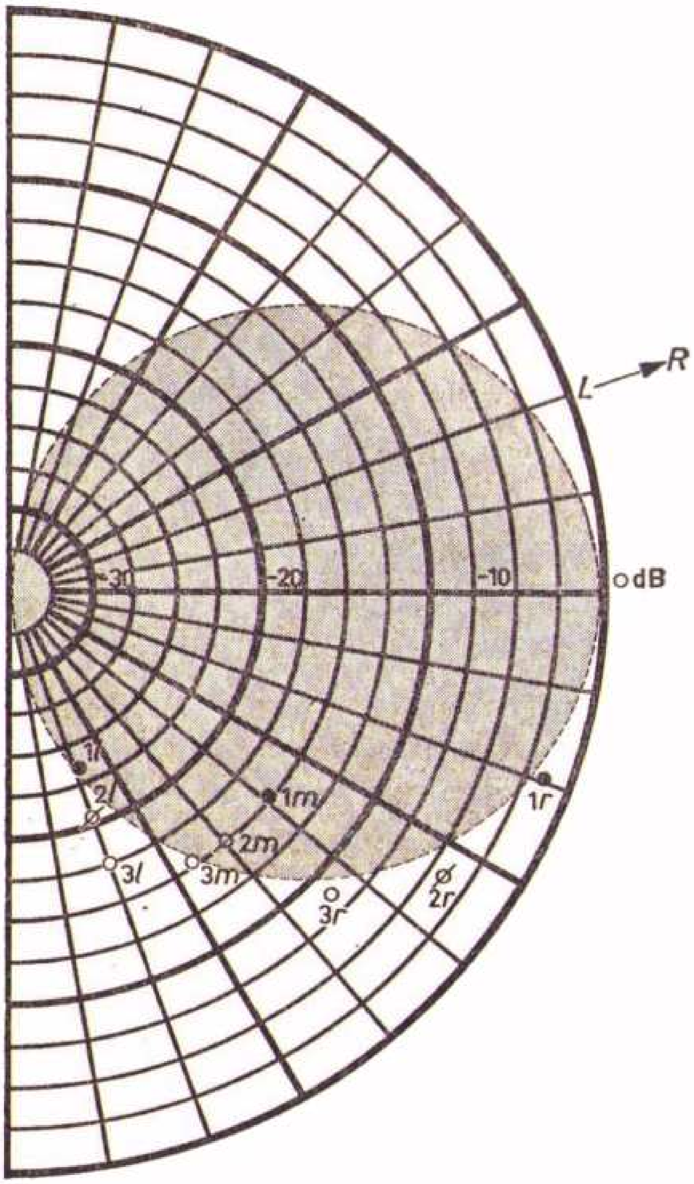


Fig. 52. Het polaire diagram van een luidspreker, dat nodig is om niet aan de „stereostoel" gebonden te zijn.

tussen de beide luidsprekers geen 3 meter is of als het stralingsdiagram niet enkelzijdig cirkelvormig is, kan een andere hoek betere resultaten geven. Dit geldt ook voor het geval dat de akoestiek van de kamer de geluidsdistributie beïnvloedt.

Het polaire diagram van elektrodynamische luidsprekers is niet voor

alle frequenties hetzelfde. Voor lage frequenties (onder 500 of 1000 Hz) is het ongeveer rond stralend en voor zeer hoge frequenties kan het een smalle gerichte ellips worden. Gericht horen is van veel minder belang voor zeer lage en zeer hoge frequenties dan voor de tussenliggende frequenties. Daarom is de eis voor een enkelzijdig cirkelvormig diagram alleen maar werkelijk van belang voor het frequentiegebied van ca. 800 Hz tot 8000 Hz. Verder wordt de weergave, als het polaire diagram niet de gewenste vorm heeft, niet slecht, alleen wordt het gebied voor goede stereoweergave kleiner.

8-4. Als er bezwaren zijn . . . . .

Een van de begrenzende factoren van High Fidelity en stereoweergave is, of kan zijn, dat de huisvrouw haar kamer niet wil ontsieren door de aanwezigheid van luidsprekerkasten en leidingen. Wij willen niet suggereren dat een van de voorwaarden voor een realistische geluidsweergave

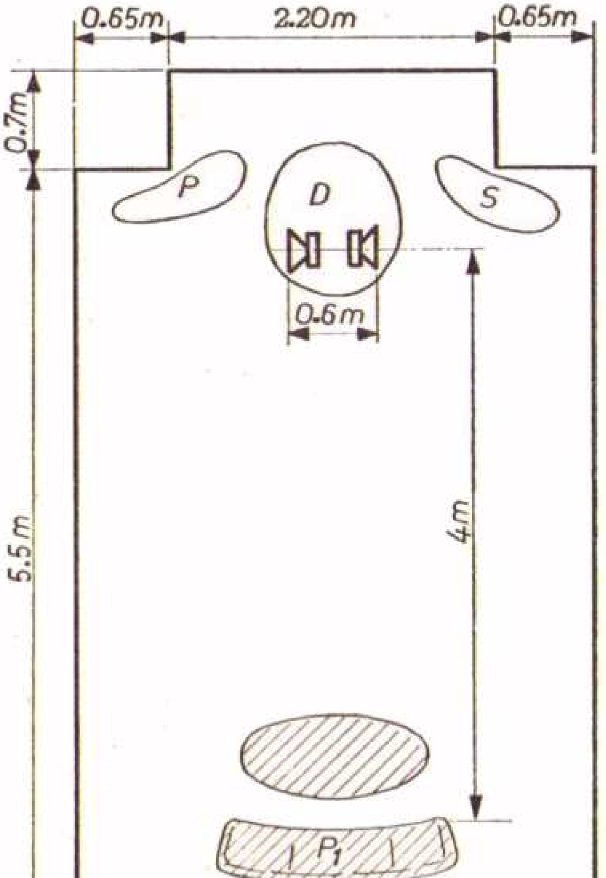


Fig. 53. Proefopstelling voor het bepalen van stereo met dicht bij elkaar staande luidsprekers, die naar de wanden zijn gericht.

P = schijnbare plaats van de piano
D = schijnbare plaats van de drums
S = schijnbare plaats van de saxofoon
P_1 = plaats van de proefpersoon.

het ongetrouwd zijn is, integendeel, wij geloven, dat het de muziek ten goede komt als men er in gezelschap naar luistert.

Wij willen ook niet beweren, dat de huisvrouw bekrompen is, te trots op haar huis of ongelijk heeft. Heel dikwijls heeft ze zelfs groot gelijk! En ook even dikwijls is het mogelijk een oplossing te vinden voor de plaats en het uiterlijk van de luidsprekerkast, die technisch juist en esthetisch aanvaardbaar is. Maar stereo maakt dat nu juist niet makkelijker. Daarom kan het soms nodig zijn beide luidsprekers in dezelfde kast onder te brengen en ze dus op te stellen op de wijze zoals dat in fig. 53 is aangegeven. Het is niet waar, dat het geluidsbeeld dan slechts 60 cm breed is omdat de reflecties van de wanden bijdragen tot het stereofonisch effect.

Om dat te onderzoeken speelden we een grammofoonplaat van een klein jazzorkest (piano - druminstallatie en saxofoon) voor 12 luisteraars, die we verzochten de schijnbare plaats van de instrumenten aan te geven op een plattegrond van de kamer. De letters in fig. 53 geven de gemiddelde plaatsen aan, die voor de piano, de druminstallatie en de saxofoon werden gevonden. De gemiddelde hoek van waarneming was 23°. De grootste 31° en de kleinste 17°. De hoek tussen de beide luidsprekers was 8°31', zodat deze luidsprekeropstelling, hoewel niet ideaal, toch nog resultaten oplevert, die zeer aanvaardbaar zijn. Door de kamer schemerig te verlichten en niet minder dan nog zeven luidsprekerkasten in de ruimte op te stellen (deze waren natuurlijk niet aangesloten) kregen we de zekerheid dat de luisteraars niet konden uitmaken welke luidsprekers werden gebruikt. Toen het licht werd aangedraaid en de proef werd herhaald, terwijl de luisteraar wist welke luidsprekers speelden, nam hij onmiddelijk een beslissing met zijn ogen in plaats van met zijn oren. Dit toont aan, dat wij geen opinie moeten vormen over de kwaliteit van de weergave uit wat wij zien.
Hoewel de verschillen over het algemeen vrij groot waren, waren de individuele verschillen hoofdzakelijk beperkt tot slechts een instrument. Bij het enige tijd later herhalen van de proef met dezelfde personen kregen we met iedere proefpersoon vrijwel dezelfde resultaten. Dit duidt erop, dat de variaties voor een deel kunnen zijn veroorzaakt door het feit, dat iedere luisteraar verschillende sporen volgde. Zo gaf bijvoorbeeld de ene luisteraar de plaats aan van de kleine trommel en een andere die van de bekkens. Dit kan een gedeelte van de verschillen verklaren. Een andere reden volgt hieronder.

Een luisteraar, waarvan de resultaten buiten onze proef werden gehou-

den, nam een hoek van ca. 8° waar tussen de piano en de saxofoon. Toen audiogrammen van zijn oren werden gemaakt bleken deze een vrij belangrijk verschil in gevoeligheid tussen het rechter en linker oor te vertonen bij normale luisterniveaus. De luisteraar, die een hoek van 17° waarnam tussen de piano en de saxofoon vertoonde dezelfde afwijking in zijn gehoororgaan, doch in mindere mate. Beiden reageerden normaal op stereo, weergegeven door twee luidsprekers, die 3 meter van elkaar af stonden. De luidsprekeropstelling, die in deze paragraaf werd beschreven is dus minder geschikt voor enkele luisteraars met een gehoorafwijking.

HOOFDSTUK IX

AMBIOFONIE

Ambiofonie is een uitdrukking, die werd bedacht door Vermeulen voor het kunstmatig opwekken van nagalm, dat wil zeggen van de geluiden, die van de omgeving (ambiance) bij de luisteraar terugkomen.

Zonder „ambiofonen", gereflecteerd geluid, klinkt muziek niet zoals zij zou moeten doen. Men realiseert zich nog steeds niet voldoende, dat de ruimte waarin wordt geluisterd een even belangrijk onderdeel van het elektro-akoestische systeem is als bijvoorbeeld de luidsprekerkast.

Het hangt zeer sterk van de akoestische eigenschappen van de ruimte af of de geluidsgolven, die door de instrumenten van een orkest worden opgewekt, worden omgezet in muziek of slechts in een min of meer muzikaal geluid.

Dit geldt natuurlijk ook voor de opneemstudio, maar iedere opneemtechnicus weet dit en houdt er rekening mee, maar dezelfde man kan geen aandacht schenken aan de akoestiek van de ruimte waarin de opname wordt weergegeven. Het is waar, dat het niet gemakkelijk is, de akoestiek van iemands huiskamer te veranderen, maar het is even waar, dat heel dikwijls de installatie de schuld krijgt van de onvolkomenheden van de kamer. Onze kamer is in feite een muziekinstrument, net als een viool, dat een goede, maar ook een slechte klank kan hebben. Hoe belangrijk nagalm is voor de subjectieve kwaliteit van de weergave bleek in 1959, toen wij een stereofonisch concert in een open veld moesten organiseren. Niettegenstaande we zelfs 2 $\times$ 120 watt elektrische energie ter beschikking hadden met minder dan 0.5% vervorming en luidsprekers met een hoog rendement, was de kwaliteit van de weergave in het in verhouding kleine luisteroppervlak, teleurstellend. Hoewel niet kon worden gezegd, dat de muziek vervormd klonk, was de kwaliteit niet zoals we konden verwachten van de werkelijk buitengewoon goede installatie.

Toen echter het fanfarekorps verscheen, waarvan wij bezig waren reeds eerder gemaakte opnamen af te spelen, bleek het, dat wij ons niet behoefden te schamen, omdat het echte fanfarekorps niet veel beter klonk in de buitenlucht. De kwaliteit van het geluid werd aanmerkelijk beter toen we de op ongeveer 8 en 15 meter achter de hoofdluidsprekers opgestelde

luidsprekers inschakelden. Het geluid van deze luidsprekers bereikte de luisteraars met een vertraging van ongeveer 25 resp. 45 milliseconde ten opzichte van het geluid van de hoofdluidsprekers. De kunstmatige nagalm was voldoende maar was ook absoluut noodzakelijk om vorm aan het geluid te geven en er muziek van te maken. In werkelijkheid klonk de weergave van het geluid met deze „ambiofonen" beter dan de echte muziek, die zonder ambiofonie werd gehoord.

Alle muziek heeft de ondersteuning van nagalm nodig. In werkelijkheid is in concertzalen het gereflecteerde geluid veel sterker dan het directe geluid, behalve misschien dicht bij het orkest. In een woonkamer is dat net zo, alleen in mindere mate (zie fig. 10). Tijdens onze proeven in de buitenlucht ontdekten we echter, dat het niveau van het nagalmgeluid minder kritisch was dan de duur ervan. Een van de oudste criteria voor de akoestische kwaliteit van concertzalen is inderdaad de nagalmtijd.

Uit proeven is gebleken, dat grote concertzalen een langere nagalmtijd moeten hebben dan de kleinere; de gunstigste nagalmtijd is:

$$T = 0{,}8 \log V_m - 1{,}46 \text{ seconde}$$

waarin V_m de inhoud van de zaal in m^3 voorstelt.

(Deze formule gaat niet op voor ruimten kleiner dan 200 m^3).

Volgens enkele musici vragen verschillende soorten muziek ook verschillende nagalmtijden, maar deze verschillen zijn, als ze worden geconstateerd, slechts gering, in de grootte van 0,2 seconde en ze kunnen worden verwaarloosd wanneer we bedenken, dat de nagalmtijd van een gemiddelde kamer minstens 1 seconde korter is dan die van de gemiddelde concertzaal. Wanneer we bedenken, dat de nagalmtijd van een gewone kamer ongeveer 0,75 seconde is en van een flinke concertzaal ongeveer 1,75 seconde, dan kunnen we ons afvragen welke invloed dit verschil uitoefent op de waardering van de muziek. De meeste muziek is gecomponeerd voor uitvoering in zalen, die groter zijn dan huiskamers en de componist zal bewust of onbewust rekening hebben gehouden met de akoestische eigenschappen van de zaal en niet van de huiskamer, behalve dan misschien voor solo's. Het is niet mogelijk alle nagalm van een concertzaal uit te zenden of te registreren en met het directe geluid in de huiskamer weer te geven, niet als het gaat om stereofonische systemen en zeer zeker niet bij monofonische weergave. Hieruit volgt, dat muziekweergave in een kleine kamer veel minder ambiofonisch zal zijn dan in een grote zaal. Bij onze proef in de buitenlucht en ook tijdens demonstraties met ambiofonie (kunstmatige nagalminstallaties) waren we in staat de nagalm naar wens in of uit te

schakelen. De beste omschrijving, die ik ken van wat nagalm voor de muziek betekent is dat hij diepte geeft aan het virtuele orkest, net zoals stereofonie aan dat orkest breedte geeft. Dit is het duidelijkste als de opname zelf met wat nagalm is gemaakt, zoals het geval was met een bandopname van een fanfarekorps, die wij ter beschikking hadden. Als de nagalm te sterk wordt maskeert hij het directe signaal en vermindert de verstaanbaarheid. Als hij te lang duurt kan hij een sterke kleuring veroorzaken en geeft de indruk dat het orkest zich van de luisteraar verwijdert. Als de nagalm tijd te kort is klinkt het orkest heel mager.

Als het gaat om de weergave van orkestmuziek, orgelmuziek en dergelijke blijkt het wenselijk, dat de effectieve nagalmtijd in de luisterruimte niet meer dan 0,2 tot 0,4 seconde verschilt van die van de concertzaal of kerk, in aanmerking nemende dat wanneer dirigenten iets over nagalmtijden vertelden, zij steeds verwezen naar verschillen van deze grootte.

Het verwijderen van alle meubelen en gordijnen uit de kamer zal de nagalmtijd vergroten, maar tevens andere akoestische eigenschappen van de kamer te niet doen. Een lege kamer zal werken als een grote Helmholtz resonator en zal enkele frequenties sterk bevoordelen en andere weer praktisch onderdrukken. Dit zal ook het geval zijn in een normaal gemeubileerde en gestoffeerde kamer, maar dan in veel geringere mate. In een dergelijke kale kamer zal het geluid sterk worden gekleurd en er zullen grote nagalmtijdsverschillen optreden voor de verschillende frequenties. De nagalmtijd kan b.v. voor een toon van 1000 Hz 4 seconden bedragen en minder dan 1 seconde voor een toon van 1250 Hz. Dit is zeer ongewenst.

Sommerville [39] heeft de volgende formule afgeleid:

$$X' = (D + 0{,}332\,R) : (1{,}64 + 1{,}542\,T_m)$$

waarin D de parameter is, die de onregelmatigheden in het uittrillen van het geluid aangeeft, dat wil zeggen of het geluid al of niet op een regelmatige wijze verandert.

R = parameter die de onregelmatigheden van de nagalmtijd/frequentiekarakteristiek aangeeft.

T_m = nagalmtijd.

X' = de kritische waarde, deze moet klein zijn.

Deze formule toont aan, dat de galm regelmatig moet afnemen en de nagalmtijd niet te veel mag variëren voor de ene frequentie en de andere. In een kale kamer zal aan geen van deze beide voorwaarden worden vol-

daan, vooral niet aan de tweede. In werkelijkheid moet de galm niet al te regelmatig zijn (zie fig. 56), maar erge onregelmatigheden moeten worden voorkomen. Dit kan gebeuren als de luisterruimte verbonden is met een tweede ruimte, b.v. een eetkamer of een grote uitbouw.

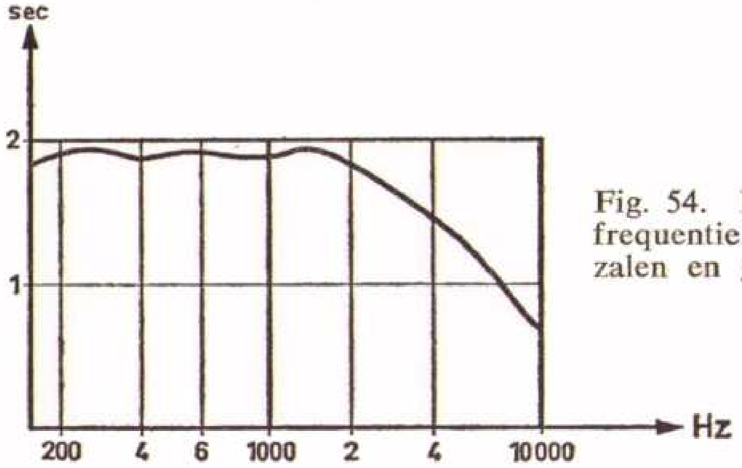


Fig. 54. De nagalmtijd als functie van de frequentie. Gemiddelde van 15 concertzalen en grote studio's.

Verder moet, zoals door Meyer [40] werd aangetoond, de nagalm regelmatig verdeeld zijn over de gehele ruimte en wel op zodanige wijze, dat ongeveer dezelfde hoeveelheid nagalmenergie de luisteraar uit alle richtingen bereikt. Ook dit is een voorwaarde, waaraan niet door een lege kamer, waarin veel staande golven optreden, wordt voldaan. Hieruit volgt, dat de eisen, dat staande golven zoveel mogelijk moeten worden onderdrukt en dat een goede spreiding van het geluid belangrijk is, het onmogelijk maken de nagalmtijd van een gewone kamer te vergroten tot die van een concertzaal.

Het is niet nodig, dat de nagalmtijd voor alle frequenties precies even groot is. Dit zou trouwens zeer moeilijk zijn te bereiken, omdat de geluidsabsorptie van de meeste materialen, met inbegrip van die, waarmee we ons kleden, toeneemt bij de hogere frequenties. Ook zal, als de relatieve vochtigheid van de lucht meer is dan 30%, en dat is haast altijd het geval, dit een absorptie van de geluidsgolven met frequenties van 3000 Hz en hoger, ten gevolge hebben en wel speciaal in grote ruimten.

In fig. 54 is de nagalmtijd getekend als functie van de frequentie voor het gemiddelde van 15 verschillende concertzalen en grote studio's. We zien uit deze kromme, dat de nagalmtijd sterk afneemt voor frequenties boven de 2000 Hz. In kleine ruimten hangt de nagalmtijd in mindere mate af van de frequentie, tenminste als in deze ruimten niet te veel gordijnen en andere stoffen zijn aangebracht. Hieruit volgt, dat kunstmatige nagalm, die nodig is om concertzaalgeluid in een huiskamer te verkrijgen,

alleen maar behoeft te worden toegevoegd voor frequenties tot ongeveer 6000 Hz.

Dat een hoge graad van spreiding, dus rondom-nagalm, nodig is kan worden verklaard uit de volgende overweging. Behalve zeer dicht bij de geluidsbron is de gereflecteerde geluidsenergie aanmerkelijk groter dan de energie van het directe geluid. Het grootste deel van het geluid bereikt de luisteraar dus uit andere richtingen dan het directe geluid.

Dit geluid mag echter de verstaanbaarheid van de muziek niet beïnvloeden. Om te voorkomen, dat iets dergelijks gebeurt moet de nagalm aan enkele voorwaarden voldoen, die betrekking hebben op zijn sterkte en duur. De nagalm mag ook niet worden gehoord als een signaal, dat gescheiden is van het directe geluid, anders zal hij een echo schijnen te zijn, wat meestal ongewenst is. Hieruit volgen weer andere voorwaarden. Tot betrekkelijk kort geleden was de bouwakoestiek evenals het bouwen van violen, voornamelijk gebaseerd op intuïtie en ondervinding. Net zo als enkele uitstekende violen werden gebouwd door mensen zonder enige wetenschappelijke kennis, werden prima concertzalen ontworpen door architecten, die niets van de wetenschap van de akoestiek afwisten. In de laatste tijd is echter de wetenschap voldoende gevorderd om een werkelijke hulp te zijn voor de vioolbouwer en voor de architect of zijn adviseur op akoestisch gebied. De kennis is nog niet volledig en de tekortkomingen maken nog steeds het maken van fouten mogelijk. De factor intuïtie blijft belangrijk en wij persoonlijk geloven, dat het altijd zo zal blijven, tenminste als het maximum moet worden bereikt, maar met dat wat nu al bekend is, kunnen grote fouten worden voorkomen en kan een beter inzicht in de akoestische verschijnselen worden verkregen.

De bandopnemer maakte het nemen van een groot aantal interessante proefnemingen mogelijk, die voor dat deze bestond praktisch onmogelijk waren. Haas [41] gaf een geluid en een kunstmatige nagalm met afzonderlijke luidsprekers weer. De intensiteit en vertraging van het nagalmsignaal konden naar wens worden ingesteld. Het bleek, dat als het begin van het nagalmsignaal 5 milliseconden of meer werd vertraagd ten opzichte van het begin van het oorspronkelijke geluid, het nagalmsignaal een 6 tot 10 dB grotere intensiteit moest hebben alvorens het even luid klonk als het oorspronkelijke geluid. De meeste luisteraars hoorden dan de nagalm niet als een afzonderlijk geluid zolang de vertraging niet boven de 30 milliseconden uitkwam. Als de intensiteit van het nagalmsignaal gelijk was aan die van het oorspronkelijke geluid kon een vertraging van on-

geveer 40 milliseconden worden toegelaten voor de nagalm werd gehoord als een afzonderlijke echo en bij een nagalmniveau van 6 dB beneden dat van het oorspronkelijke geluid kon de vertraging worden opgevoerd tot 80 milliseconden. Binnen deze grenzen werd het nagalmsignaal dus waargenomen als een zuivere voortzetting van het gewenste signaal en niet als een afzonderlijk signaal en hieruit volgt dat de waargenomen richting van het samengestelde geluid die was van het directe geluid.

Een soortgelijke proefneming, waardoor nog meer aan het licht kwam werd niet zo lang geleden genomen door Franssen [38]. Een toonimpuls werd gesplitst in twee delen, en wel het begin en het eind (het tijdelijke deel) en de rest, die continutoon werd genoemd. Het tijdelijke gedeelte werd toegevoerd aan een luidspreker en de continutoon aan een tweede luidspreker, opgesteld op de wijze als is aangegeven in fig. 55. Het schijnt

Fig. 55. Opstelling van de luidsprekers voor het waarnemen van de invloed van de overgangen van een toon op de plaatsbepaling daarvan.

vreemd, maar de gehele toonimpuls scheen van de luidspreker te komen, die alleen het voorbijgaande deel weergaf. Het was zelfs mogelijk een tijdsverloop tot 50 milliseconden te introduceren tussen het begin van de aanlooptoon en het begin van de continutoon en de continutoon tot 4 seconden te laten duren, de toon scheen nog steeds in zijn geheel te komen van de luidspreker, die slechts het tijdelijke deel weergaf. Ik moest naar de linker luidspreker lopen om mezelf ervan te overtuigen, dat mij geen poets werd gebakken. Deze proef bewijst overtuigend en afdoend dat van een samengesteld geluid, dat bestaat uit een begin en een voortzetting, de richting wordt bepaald door het begin, vooropgesteld, dat de vertraging tussen de aanlooptoon en de continutoon minder is dan 50 milliseconden. In een concertzaal kan het directe geluid worden beschouwd als de aanlooptoon en de nagalm als de continutoon uit de proeven van Franssen.

Uit deze twee proeven kunnen we de conclusie trekken, dat de nagalm niet als een ruimtelijk gescheiden geluid wordt gehoord, onafhankelijk van de grootte van de nagalmtijd, echter vooropgesteld, dat de nagalm

niet meer dan 50 milliseconden ten opzichte van het oorspronkelijke geluid is vertraagd en ook vooropgesteld, dat de nagalm niet meer dan 6 tot 10 dB sterker is dan de oorspronkelijke toon. Slechts een zeer lang aanhoudende nagalm, en dan zal hij meestal ook zeer sterk zijn, kan afzonderlijk worden gehoord en wel als een echo, ook als deze niet meer dan 50 milliseconden is vertraagd.

In het geval, dat de nagalm niet regelmatig is verdeeld, maar de luisteraar voornamelijk bereikt uit slechts een of twee richtingen, zal de nagalm hoofdzakelijk worden bepaald door deze twee hoofdreflecties. Het is zeer goed mogelijk, dat deze meer dan 6 dB sterker zijn dan het directe geluid of de luisteraar meer dan 50 milliseconden later bereiken dan het directe geluid. Het is ook mogelijk, dat het tijdsverloop tussen de respectievelijke hoofdreflecties meer dan 50 milliseconden bedraagt. In dat geval wordt de nagalm niet langer gehoord als zijnde verbonden met het directe geluid en dit ondersteunende.

Als de nagalm de luisteraar met ongeveer dezelfde intensiteit uit alle richtingen bereikt zal hij met het directe geluid samensmelten. In dit geval kan geen speciale richting aan de nagalm worden toegekend. Komt hij echter later bij de luisteraar dan het directe geluid, dan geeft hij de indruk van verder weg te komen. De enige richtingsinformatie, die de luisteraar krijgt is van het directe geluid en de erbij komende nagalm zal dan van achter het orkest schijnen te komen. De muziek krijgt diepte. Zonder nagalm heeft de muziek geen diepte.

In een kamer van bescheiden afmetingen is het niet mogelijk langs zuiver akoestische weg de nagalmtijd op te voeren tot langer dan ongeveer 0,75 seconde zonder gestraft te worden met bijkomende verschijnselen, die er de oorzaak van zijn dat de kwaliteit van het geluid slechter wordt. De enige manier om een voldoend lange nagalmtijd te verkrijgen is kunstmatige nagalm langs elektro-akoestische weg op te wekken. Een van de manieren om dat te doen zou zijn het nagalmgeluid van een concertzaal afzonderlijk te registreren en deze opname tegelijk met de weergave van de muziek af te spelen via een afzonderlijke installatie. Een andere manier is het opwekken van een nagalmsignaal langs elektro-akoestische weg. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden bekend, om er een paar te noemen: de tuinslang, nagalmplaat, nagalmmachine, spiraalveren. Welke methode ook mag worden toegepast, zij moet steeds aan een aantal eisen voldoen. Een daarvan is, dat het eerste nagalmsignaal binnen 50 milliseconden op het directe signaal moet volgen en dat de bijbehorende

signalen moeten volgen met een tussenruimte van minstens een per 50 milliseconden, bij voorkeur echter 20 tot 30 milliseconden of minder.

De herhalingstijd mag niet te regelmatig zijn ten einde te voorkomen dat de nagalm gaat klinken als mitrailleurvuur. De verzwakking van het signaal moet behoorlijk regelmatig verlopen (zie fig. 56). De nagalmtijd moet in de orde van 2 seconden liggen en bij voorkeur instelbaar zijn. De nagalmtijd moet voor de hogere frequenties ook nog afnemen, ongeveer op de wijze als in fig. 54 is aangegeven. Ten slotte moet het nagalmgeluid regelmatig over de ruimte worden verdeeld. Deze laatste eis wil zeggen, dat in grote zalen verschillende luidsprekers moeten worden gebruikt voor de weergave van het nagalmsignaal.

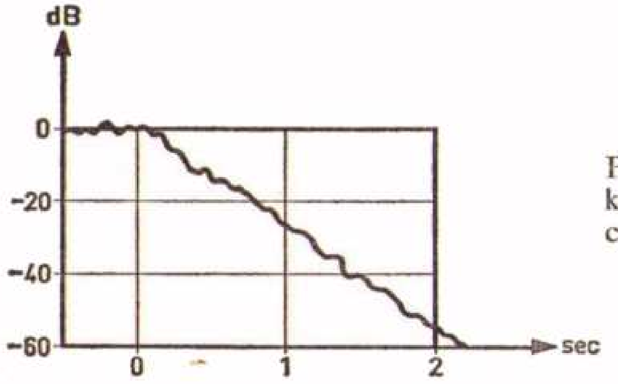


Fig. 56. Voorbeeld van een uitslingerkarakteristiek van het geluid in een goede concertzaal.

In een woonkamer is dit geen probleem en daar zijn zeer goede resultaten mogelijk met een enkele luidspreker. Dit kan worden ingezien als we fig. 55, die de proef van Franssen voorstelt, beschouwen. Als de linker luidspreker nu het oorspronkelijke signaal en de rechter luidspreker de kunstmatige nagalm weergeeft dan zal de richting van het geluid weer volkomen worden bepaald door de plaats van de linker luidspreker. De nagalm zal worden gehoord als komende van verder weg dan het directe geluid en niet als komende van rechts. Dat gaat alleen op als de nagalm niet te luid is en als het gewenst is de nagalmenergie te verhogen tot boven de energie van het oorspronkelijke geluid zal het nodig zijn te voorkomen, dat directe uitstraling van de nagalmluidspreker de luisteraars in de kamer bereikt. Dit kan natuurlijk worden bereikt door de nagalmluidspreker van de luisteraars af te richten naar de wand of het plafond. Hoe groter de graad van spreiding is die wordt bereikt, des te meer kunstmatige nagalm kan worden toegestaan maar we moeten wel bedenken, dat nagalm net als zout in de aardappelen, een middel is om tot een doel te geraken.

HOOFDSTUK X

PROEFONDERVINDELIJK BEWIJS

10-1. Spreker of luidspreker?

Als theorie en proeven met elkaar kloppen, dan is dat verdacht. Als ze dadelijk kloppen zijn ze meestal allebei fout, als ze later kloppen dan zijn ze misschien beide „gecorrigeerd" om ze kloppend te maken.

De voorgaande hoofdstukken waren een mengelmoes van theorie en proeven waaruit conclusies werden getrokken voor enkele punten van de technische specificatie. Als proeven worden genomen met geheel elektro-akoestische systemen, die voldoen aan de verschillende punten van de specificatie, dan liggen theorie en proef voldoende ver uit elkaar. Als er dan overeenstemming tussen beide blijkt te bestaan, dan behoeven we niet zo achterdochtig te zijn, hoewel voorzichtigheid geboden blijft.

Vele demonstraties zijn er gegeven aan beide zijden van de Atlantische Oceaan, waarbij echte muziek werd vergeleken met gereproduceerde muziek en de resultaten van dergelijke demonstraties waren dikwijls zeer bevredigend. Helaas werden slechts enkele van deze demonstraties of proeven zodanig geleid, dat zij het mogelijk maakten kwantitatieve conclusies te trekken.

Dit hoofdstuk is gewijd aan drie experimenten, waarbij kwantitatieve gegevens werden verzameld. Het eerste daarvan betrof de weergave van spraak, het tweede de monofonische weergave van solo-instrumenten en het derde de stereofonische weergave van kleine ensembles.

Alle drie de experimenten hadden gemeen, dat aan een grote groep toehoorders echte en geregistreerde muziek of spraak werd aangeboden en dat aan iedere deelnemer aan de proef werd gevraagd vast te stellen of de verschillende nummers direct of gereproduceerd werden gehoord.

In die gevallen, waarin geen verschil kan worden gehoord tussen echte en geregistreerde muziek zullen slechts weinig mensen dat toegeven. Zij zullen blijven luisteren naar aanwijzingen en hun conclusies baseren op details, die niets te maken hebben met de oorsprong van het geluid waarnaar zij luisteren. Gedurende proeven stelde ik vast, dat als een spreker een kleine fout maakte iedereen dacht dat de weergave echt was omdat

iedereen verwacht, dat een registratie zonder fouten zal zijn. Dus als een instrument ontstemd is zal men geneigd zijn echte muziek als opgenomen aan te geven en wel om de eenvoudige reden dat niemand verwacht dat een snaar van een concertvleugel niet goed gestemd kan zijn, maar van een opname wordt nu eenmaal niets goeds verwacht.

Een van de voorwaarden voor dergelijke proeven is, dat de musici zonder fouten spelen, anders zullen de resultaten verdoezeld worden door conclusies, die gebaseerd zijn op de fouten en niet op de werkelijke kwaliteit van de weergave. Bij volkomen foutloos spelen en absolute weergavegetrouwheid zullen juiste en onjuiste antwoorden voldoen aan de regels van de kansrekening. Dit is een nette manier om te zeggen, dat iedereen er maar naar raadt. De volmaakte succesvolle proefneming van echte contra opgenomen muziek levert 50% juiste en 50% onjuiste antwoorden op.

Een proef op het gebied van echte spraak tegenover geregistreerde spraak werd genomen door F. Enkel [42]. Opnamen van spraak met afsnijfrequenties van 15, 8 en 5 kHz werden afgewisseld met directe spraak en aan de proefpersonen werd gevraagd wat zij hadden gehoord, echte spraak of weergegeven spraak. Een zekere groep toehoorders, die het polaire type worden genoemd, kon nauwelijks enig verschil horen tussen directe spraak en weergegeven spraak met beperkte bandbreedte (fig. 57b). Blijkbaar zijn deze toehoorders niet analytisch aangelegd en het is dus niet waarschijnlijk, dat zij dit boek zullen lezen. Het lineaire type luisteraar (fig. 57a) neemt verschil waar in het frequentiegebied, maar als de

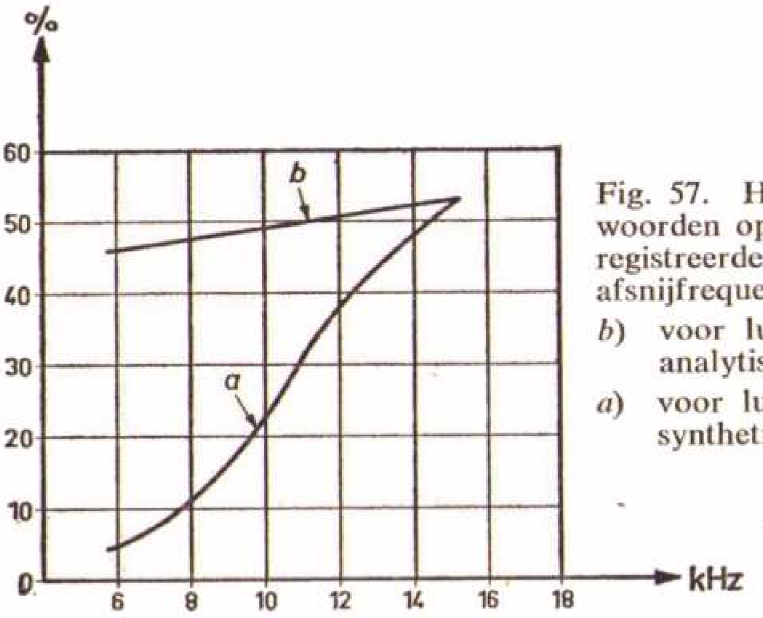


Fig. 57. Het percentage fouten in antwoorden op de vraag "werkelijke of geregistreerde spraak", als functie van de afsnijfrequentie.

b) voor luisteraars van het linaire of analytische type.

a) voor luisteraars van het polaire of synthetische type

weergave wordt uitgebreid tot 15 kHz wordt het voor hen onmogelijk verschil te horen tussen werkelijk geluid en geregistreerd geluid. Het is interessant om vast te stellen, dat bij een weergave tot 15 kHz het aantal fouten toenam tot boven de 50%. Het is mogelijk, dat dit te wijten is aan niet te voorkomen grensfouten van proeven, die met een beperkt aantal personen worden genomen, maar het kan ook zijn, dat door de een of andere reden de directe spraak werd beïnvloed door een of andere secundaire invloed, zoals b.v. de akoestiek of dat ten gevolge van een kleine afwijking in de weergavekromme van de installatie de weergegeven spraak natuurlijker klonk dan de echte spraak.

Dit kan worden aangetoond door een proef, die wij als volgt hebben genomen. Een opname van een contrabas werd vergeleken met het directe geluid van het instrument. Als de weergavekarakteristiek van de lage frequenties recht was, lag het aantal juiste antwoorden op de vraag: „Echt of weergave" zeer dicht bij de 50%. Als de lage tonen weergave in verhouding slechts weinig slechter werd gemaakt liep het aantal goede antwoorden op tot bijna 100%. Werd daarentegen de weergave van de lage frequenties verbeterd, dan waren vrijwel alle antwoorden fout. Blijkbaar dachten de luisteraars bij de vergelijking van het echte en weergegeven geluid dat de vollere lage tonen nooit van een elektro-akoestische installatie afkomstig konden zijn. Met dit voor ogen kunnen we de conclusie trekken dat spraak zo goed kan worden weergegeven, dat het onmogelijk is onderscheid te maken tussen echte en opgenomen spraak.

Absolute getrouwheid is voor spraak mogelijk, vooropgesteld dat onder andere de weergavekarakteristiek zich uitstrekt tot minstens 15 kHz.

10-2. De getrouwheid van monofonische weergave

De schrijver van dit boek leidde een experiment waarbij de weergave van solo-instrumenten werd gecontroleerd op getrouwheid. Dit was de voortzetting van een demonstratie, die in het Amsterdamse Concertgebouw werd gehouden en waarbij de leden van een dansband de een na de ander hun instrument neerlegden en wegliepen, terwijl de muziek doorging. Verschillende personen verklaarden na de demonstratie, dat zij duidelijk het verschil in klank hadden gehoord nadat de musici hun instrumenten hadden neergelegd. Het interessante hierbij was, dat de opname steeds de laatste 6 maten voor de instrumenten werden neergelegd, reeds overnam,

terwijl de musici dan schijnbewegingen maakten. Slechts een persoon had dit opgemerkt. Blijkbaar was, als er enig verschil bestond tussen de opgenomen en de echte muziek, dit verschil zo klein, dat het zien van de bewegingen van de musici voldoende was om het te camoufleren. Dit experiment leidde tot een proef, waarbij van een dansband, bestaande uit een piano, slagwerk, accordeon, saxofoon en contrabas een van de instrumenten van te voren was opgenomen, waarna de opname werd gespeeld terwijl de andere musici normaal speelden en alleen degeen, wiens instrument werd opgenomen, schijnbewegingen maakte.

Het publiek bestond uit geluidsingenieurs, leden van de afdeling Eindhoven van de VERON (Vereniging voor experimenteel radio-onderzoek in Nederland), leden van de plaatselijke grammofoonplatenclub en enkele beroepsmusici, in totaal 130 personen. Hen werd na ieder stuk, dat was gespeeld, gevraagd op een formulier in te vullen welk instrument volgens hen was opgenomen. De installatie bestond uit een uitstekende condensatormicrofoon, een studio-bandopname-apparaat, een 60 watt versterker en twee parallel geschakelde luidsprekercombinaties. De versterker en de luidsprekers waren van normale handelsuitvoering. De totale weergavekarakteristiek zag eruit als in fig. 58 is aangegeven. De kromme was in

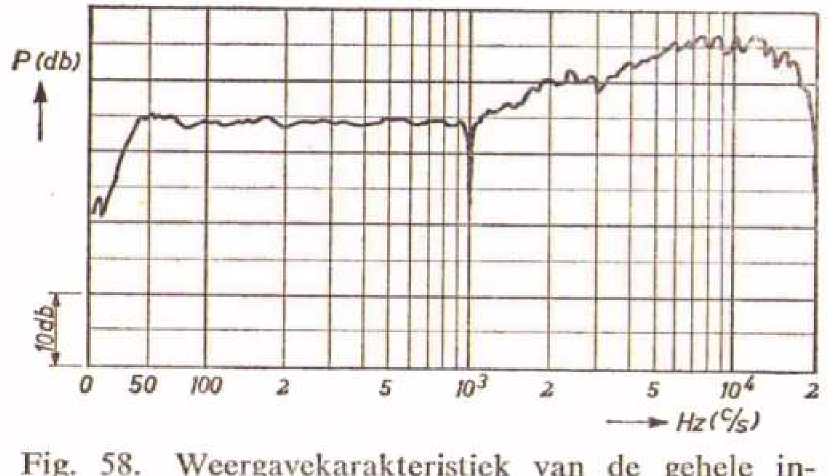


Fig. 58. Weergavekarakteristiek van de gehele installatie, die werd gebruikt voor een vergelijkende proef tussen direct geluid en monofonische weergave.

een dode ruimte opgenomen op de as van de luidsprekers. Tijdens het experiment waren de luidsprekers zodanig opgesteld, dat zelfs voor de hogere frequenties een vrijwel rechte geluidsdrukkarakteristiek werd verkregen. Het experiment vond plaats in de aula van het Academisch Genootschap in Eindhoven.

De vervorming van de gehele installatie, met inbegrip van de luid-

sprekers, werd slechts bepaald voor 400 Hz als functie van het elektrische uitgangsvermogen. Deze is getekend in fig. 59. Het akoestische vermogen, dat door het orkestje werd voortgebracht werd geschat op 3 watt. Het

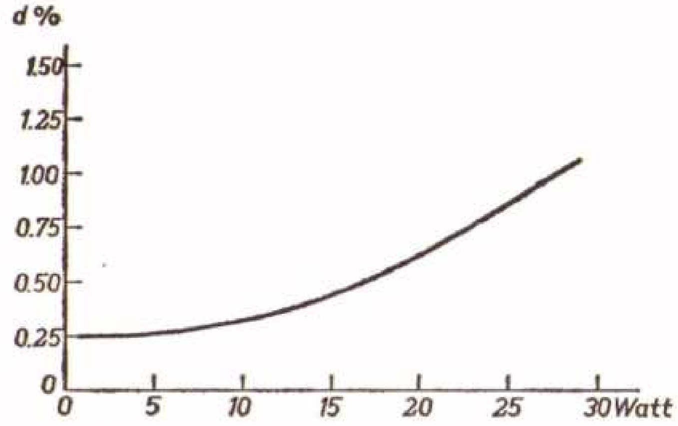


Fig. 59. Totale vervormingkromme van de installatie, die werd gebruikt voor een vergelijkende proef tussen direct geluid en monoweergave. Frequentie 400 Hz.

rendement van de luidsprekers was 4%, dat wil dus zeggen, dat 75 watt elektrisch vermogen nodig zou zijn om het geluid van dit dansorkest weer te geven. Dat is 1 dB meer dan het berekende vermogen van de versterker, een te verwaarlozen verschil. De zweving bedroeg minder dan 0,3% top tot top. Vier nummers van drie tot vier minuten werden gespeeld. Bij ieder nummer waren een of twee van de instrumenten van het begin tot het eind opgenomen en de programma keuze was zodanig, dat er voldoende gelegenheid was om naar het betreffende instrument te luisteren.

Van de 130 toehoorders werden 107 geheel ingevulde vragenformulieren terugontvangen. Het totale aantal onjuiste antwoorden bedroeg 378. Als de 107 personen alleen maar geraden hadden zou het aantal onjuiste antwoorden 720 zijn geweest. Dus konden enkele mensen het verschil horen en anderen niet. De 23 personen, die hun vragenlijst niet inleverden hoorden waarschijnlijk geen verschil tussen echte en gereproduceerde muziek, maar omdat we daar niet zeker van zijn wordt hiermee geen rekening gehouden.

Het aantal fouten, dat voor ieder instrument werd gemaakt is aangegeven in tabel 13.

Tabel 13

Instrument	Resultaten voor ieder instrument Aantal fouten
accordeon	62
contrabas	150
piano	74
saxofoon	48
slagwerk	44
	378

We zullen nu de verschillende instrumenten afzonderlijk bespreken.

Contrabas

Door de lage tonen, die dit instrument voortbrengt, is het zeer moeilijk uit te maken uit welke richting het geluid komt, zodat de resultaten in dit geval niet werden beïnvloed door indicaties, verkregen van de schijnbare richting van het geluid, wat anders moeilijk is te voorkomen bij monofonische weergave, waarbij de plaats van de luidsprekers niet verandert tijdens de proef. Het is daarom niet te verwonderen, dat het grootste aantal onjuiste antwoorden, 150, werd gegeven voor de contrabas. In tabel 14 zijn de werkelijke cijfers opgenomen in de kolom met het opschrift „in werkelijkheid", terwijl de cijfers, die gevonden zouden zijn als de beoordelingen lukraak waren opgeschreven genoteerd staan in de kolom met het opschrift „Geraden". We zien, dat de verschillen slechts klein zijn, zodat we kunnen aannemen, dat de meeste toehoorders er naar hebben geraden.

Tabel 14

	In werkelijkheid	Geraden
contrabas gehouden voor weergave	61	54
weergave gehouden voor contrabas	89	90
weergave als zodanig herkend	18	18

Piano

Voor de piano werden 74 onjuiste antwoorden ingeleverd. In tabel 15 hebben we een extra kolom toegevoegd met het opschrift „Dubieus". De getallen, die in deze kolom staan, die zeer dicht bij de werkelijke aantallen komen, zouden er ook zijn uitgekomen als de helft van de toehoorders alleen maar er naar geraden had.

Tabel 15

	In werkelijkheid	Geraden	Dubieus
piano gehouden voor weergave	27	63	27
weergave gehouden voor piano	47	84	45
weergave als zodanig herkend	60	21	62

Blijkbaar kon de helft van de proefpersonen niet het verschil horen tussen de werkelijke piano en het gereproduceerde geluid. Herkenning was beter op de eerste vier rijen stoelen dan op de resterende acht rijen, wat erop wijst, dat het richtingseffect de resultaten kan hebben beïnvloed. De

piano stond links op het podium, maar het weergegeven geluid scheen als de zaal vol mensen zat precies uit het midden te komen.

Accordeon

Het aantal onjuiste antwoorden voor de accordeon was 62 tegen 74 voor de piano. De verdeling van de fouten kwam overeen met die voor de piano. De plaats van de schijnbare geluidsbron was vrij onbepaald, wat de beoordeling kan hebben beïnvloed.

Saxofoon

Voor de saxofoon kwamen slechts 48 onjuiste antwoorden binnen. Tijdens een latere demonstratie in Noorwegen vonden we een verklaring en een oplossing hiervoor, maar helaas hadden we geen gelegenheid tot een kwantitatieve proef. De saxofoon heeft een uitgesproken richtingseffect, onze luidsprekers waren aanmerkelijk minder gericht. Bij de demonstraties in Eindhoven was de opstelling van de microfoon en de instrumenten zo-

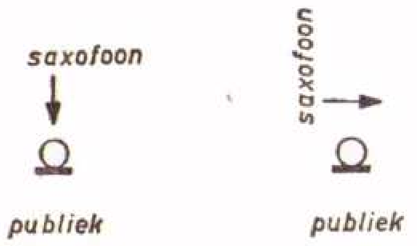


Fig. 60. Twee verschillende plaatsen van de saxofoon, die werd gebruikt in de vergelijkende proeven tusen directe en geregistreerde weergave.
a) gericht op microfoon en publiek
b) gericht langs de microfoon en het publiek.

als aangegeven in fig. 60a. De microfoon ontving dus de hoge tonen op volle sterkte, het publiek slechts voor zover het direct tegenover de saxofoon zat. Voor wat betreft de weergave van de opname, hierbij hoorden de luisteraars opzij in de zaal meer hoge tonen dan wanneer zij naar de echte saxofoon luisterden. Dit verschijnsel werd voorkomen door de saxofoon te plaatsen op de wijze zoals dat in fig. 60b is aangegeven. De resultaten waren toen beter.

Slaginstrumenten

Het richtingseffect was voor zover het de bekkens en vliegeklappers betreft, sterk uitgesproken. In de volle zaal scheen het geluid van deze instrumenten van dicht bij het plafond te komen. Dat we toch 44 onjuiste antwoorden binnen kregen kan worden verklaard door het feit, dat enkele mensen geen aandacht schonken aan deze richtingswerking, misschien omdat zij zich volkomen concentreerden op de kwaliteit van het geluid.

Slechts drie van de 107 vragenlijsten waren zonder fouten. Twee daar-

van waren van zeer gespecialiseerde geluidsingenieurs en de derde was van een muziekkriticus en concertpianist.

Op de vragenlijsten stonden nog enkele andere vragen, die van zodanig belang waren, dat we ze hier willen noemen.
Deze vragen waren:

Bent u een technicus of een geluidsamateur?
Houdt u zich in uw beroep bezig met elektro-akoestiek?
Bespeelt u een instrument?
Bent u een man onder de 40 jaar?
Bent u een man boven de 39?
Bent u een vrouw?

De antwoorden stelden ons in staat tabel 16 samen te stellen.

Tabel 16
Resultaten van verschillende groepen luisteraars

Groep	Aantal personen	Gemiddeld aantal fouten
technici (met inbegrip van geluidstechnici)	68	3,47
niet technici	39	3,5
bespeelt een instrument	42	3
bespeelt geen instrument	65	3,83
man onder de 40 jaar	67	3,4
man boven de 39 jaar	22	4
vrouwen (zij waren alle onder de 40 jaar)	13	3,12
geluidstechnici	13	3

Hoewel de groepen feitelijk te klein zijn om betrouwbare conclusies te trekken blijkt uit tabel 16 toch wel, dat geluidstechnici en musici (amateurs en beroeps) beiden ongeveer even kritisch zijn en iets kritischer dan het gemiddelde publiek. Personen boven de 40 jaar zijn minder kritisch dan mensen, die jonger zijn en de dames zijn kritischer dan de heren. De verschillen zijn echter maar gering. Het doel van onze proef was zowel de invloed na te gaan van monofonische weergave met verspreid opgestelde luidsprekers (2 lage tonen luidsprekers en 4 middenregister hoge tonen luidsprekers werden gebruikt), als de natuurgetrouwheid van de weergave. Wanneer we een speciale luidsprekeropstelling hadden gekozen voor ieder instrument dan zouden de resultaten zonder twijfel veel beter zijn geweest. Dit was echter onmogelijk in verband met andere demonstraties met opnamen van het gehele orkest.

Wanneer we de invloed van de richteffecten op de uitkomst van de proeven in rekening brengen, dan kunnen we zeggen, dat bij de gebruikte installatie minstens 50% van dit bijzonder geïnteresseerde publiek geen onderscheid kon maken tussen echte en geregistreerde solo-muziek.

De resultaten zouden overtuigender zijn geweest als grammofoonplaten in plaats van bandopnamen zouden zijn gebruikt. Dit bleek echter onmogelijk te zijn. Het maken van speciale grammofoonplaten is niet alleen duur, maar kost ook te veel tijd, wat inhoudt, dat er te veel tijd zou verlopen tussen de opname en de eigenlijke proef.
Dit zou moeilijkheden kunnen opleveren met de stemming van de instrumenten en de maat. Proeven van deze aard zijn waarschijnlijk het succesvolst als de uitvoering voor het publiek direct volgt op de opname.

Handelsplaten waren niet bruikbaar omdat er geen platen bestonden van het dansorkest, opgenomen met dezelfde musici en verschillen in stijl, techniek en instrument zouden voor de luisteraars belangrijke richtlijnen vormen.

In ieder geval waren de proeven ook beslissend voor de bezitter van een platenafspeelinstallatie, daar de versterker en de luidsprekers aan zekere technische eisen moeten voldoen onafhankelijk van de kwaliteit van het ingangssignaal, vooropgesteld dat de kwaliteit van het signaal zeer goed is.

10-3. High Fidelity Stereofonie

Een uitgebreidere en zeer interessante reeks proeven werd genomen door Vermeulen [43]. Hierbij werd de stereofonische weergave van een dansorkest (hetzelfde dat voor de vorige proef werd gebruikt), een trio van strijkinstrumenten en een strijk-sextet vergeleken met de werkelijke muziek. Het aantal proefluisteraars was meer dan 300, voornamelijk ingenieurs, administratieve en commerciële leden van de staf, secretaressen enz. Het orkest was opgesteld achter een dun, doch ondoorschijnend gordijn. Opnamen werden gemaakt met behulp van een kunsthoofd, dat is een bol waarvan de doorsnede ongeveer gelijk is aan die van het menselijke hoofd, waarin tegenover elkaar twee microfoons zijn geplaatst.

De gang van zaken tijdens de proef was zodanig, dat een zelfde kort muziekstuk drie maal werd gespeeld. De eerste keer (*A*) was of stereo of echt, de tweede keer (*B*) echt of stereo. Direct daarop volgde de derde

uitvoering (X) die een herhaling was van A of B. De toehoorders moesten nu twee vragen beantwoorden:

1) Was X hetzelfde als A of hetzelfde als B?
2) Welke van de twee, A of B, was het natuurlijkste?

De toehoorders wisten niet, dat er musici achter het gordijn zaten en zij kregen geen aanwijzingen, waaruit zij zouden kunnen opmaken, dat er ook echt muziek werd gemaakt. Van de twee vragen was de eerste het gemakkelijkste te beantwoorden. Het voordeel is, dat deze methode ondubbelzinnig het verschil aangeeft tussen echte en geregistreerde muziek, onafhankelijk van secundaire verschijnselen, die de resultaten zouden kunnen vertroebelen bij minder serieuze proeven. De tweede vraag is moeilijker, omdat hierbij van de toehoorder wordt verlangd, dat hij ook enig idee heeft hoe echte muziek klinkt. Bij de beide hiervoor beschreven proeven waren de luisteraars zich ervan bewust, dat zij gedurende 50% van de proef naar echte muziek luisterden en bij de proef, die wij leidden hadden ze zelfs het voordeel, dat zij zich tijdens de daaraan voorafgaande proeven vertrouwd konden maken met de werkelijke klank van ieder instrument.

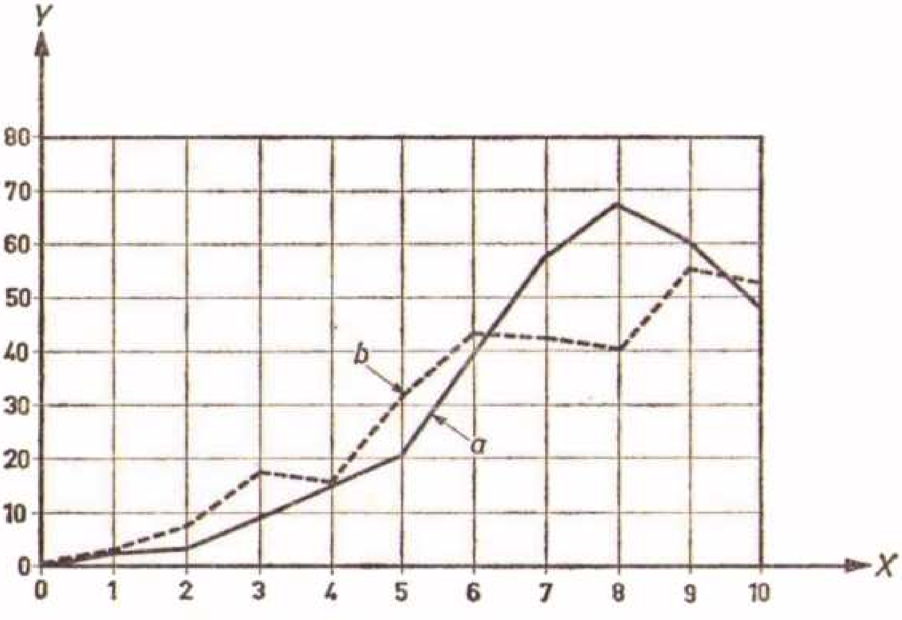


Fig. 61. Het aantal personen y, dat juiste antwoorden gaf op x van de 10 vragen.
a) Is X gelijk aan A of B?
b) Wat is natuurlijker, A of B?

Fig. 61a laat het percentage luisteraars (Y) zien, dat het juiste antwoord (X) gaf, uitgezet tegen de antwoorden op vraag 1: „Was X hetzelfde als

A of hetzelfde als *B*?" Gemiddeld was 75% van het totale aantal antwoorden goed. Dit klopt met het geval, dat 50% van de antwoorden juist was en 50% alleen maar geraden.

De resultaten, die met de tweede vraag: „Wat is de natuurlijkste weergave, *A* of *B*?" werden verkregen zijn verzameld in fig. 61b. Hier was het gemiddelde aantal goede antwoorden 71%. Dit is het resultaat dat zou zijn verkregen als 42% antwoorden het gevolg waren van juiste beslissingen en de overige 58% gissingen.
De getallen moeten nu niet zodanig worden verklaard, dat altijd 50% van de proefpersonen het juiste antwoord geven en dat de overige 50% alleen maar hebben geraden of *X* gelijk was aan *A* of aan *B*.

Een verdere analyse van de resultaten die voor vraag 1 werden verkregen toonde aan, dat voor de verschillende toehoorders de kans voor het geven van een goed antwoord varieerde van 55 tot 95%. Dat betekent, dat voor sommige toehoorders het verschil praktisch niet te horen was, terwijl het voor anderen wel veel meer voor de hand lag, maar toch niet zodanig, dat hun antwoorden altijd goed waren.

De eigenschappen van de installatie, die door Vermeulen werd gebruikt waren dezelfde als van die welke door de schrijver werd gebruikt, tenminste voor zover het de weergavekarakteristiek en de vervorming betreft. Het voornaamste verschil tussen beide proeven was, dat Vermeulen met stereofonische opnamen en weergave werkte en wij met monofonische. Wij namen slechts een muziekinstrument per keer op, waardoor de monofonische weergave bij onze proeven geen beperking van de kwaliteit veroorzaakte, hoewel er wel enkele plaatsbepalingsfouten door ontstonden. De totale resultaten van de beide series proeven komen zeer sterk met elkaar overeen. Beide leverden ongeveer 50 % juiste beslissingen en 50% gissingen op.

Dat betekent, dat beide proeven elkaar ondersteunen. Een andere conclusie, die kan worden getrokken is, dat de stereofonische weergave van een orkest van 8 musici net zo goed was als de monofonische weergave van een enkel instrument. Zou het orkest monofonisch zijn weergegeven, dan zouden de toehoorders geen moeite hebben gehad verschillen te constateren tussen *A* en *B* en dan zouden alle antwoorden op de vragen juist zijn geweest.

Als de ruimtelijke spreiding van het stereofonisch weergegeven geluid van het orkest onvoldoende zou zijn geweest, zou dit een toeneming hebben veroorzaakt van juiste antwoorden. Het feit, dat de resultaten van

beide proeven praktisch gelijk waren wijst erop, dat de ruimtelijke spreiding van het weergegeven geluid voldoende overeenkomst vertoonde met die van het echte geluid. De scheiding van de twee kanalen van de installatie, die door Vermeulen werd gebruikt was aanmerkelijk beter dan aangegeven in Hoofdstuk VIII, maar de andere eigenschappen kwamen daarmee vrijwel overeen. Wanneer we bedenken, dat onze specificatie voor het overspreken gebaseerd was op proefnemingen, kunnen we aannemen dat als bij de proeven van Vermeulen de scheiding in de buurt van 25 dB had gelegen, de uitkomst van deze proeven praktisch dezelfde zou zijn geweest.

„Echt contra geregistreerd" demonstraties zijn ook gedaan met symfonie-orkesten; het waren echter geen proeven, zoals hierboven beschreven.

Vermeulen [43] schreef over een proefneming met een groot orkest en hoewel geen cijfers beschikbaar waren gaf de mening van de toehoorders hem de indruk, dat ook nu weer de stereofonische weergave bedrieglijk veel leek op de werkelijkheid. Hij voelde zich dus gerechtigd vast te stellen, dat het mogelijk is de onvolkomenheden van een elektro-akoestische installatie op een zodanig laag niveau te houden, dat zij vrijwel niet meer te horen zijn, zelfs niet in het geval van een groot orkest.

Verwacht mag worden, dat door de vooruitgang van de psycho-akoestiek het mogelijk zal zijn de verschillende eisen met nog groter nauwkeurigheid te omschrijven dan wij dat konden doen. Verder mogen we ook nog rekenen op verdere verbetering van de weergeefinstallatie en dan zal het dus te zijner tijd mogelijk zijn muziek op een zodanige wijze weer te geven, dat niemand bij een proefneming in staat zal zijn echte muziek van weergegeven muziek te onderscheiden. Dat wil zeggen, dat het aantal gissingen 100% zal zijn in plaats van 50%. We moeten wel bedenken, dat deze verbetering niet zal worden opgemerkt door iedereen, die naar de muziek luistert ter wille van de muziek en niet ter wille van een proefneming. De tegenwoordige verschillen zijn al zo klein dat ze, om te kunnen worden opgemerkt, een volledige concentratie op het geluid vergen. Bij dergelijke proeven is het dan niet meer mogelijk naar de muziek te luisteren. Ik ondervond zelf, dat tijdens een van de stereoproeven een lichte vermoeidheid voldoende was om mijn resultaten van 85% goed tot 57% goed, of te wel praktisch raden, te doen afnemen. Zelfs de mensen met „gouden oren", die vrijwel alleen goede antwoorden hadden tijdens alle stereo- en monofonische proeven bevestigden, dat zij niet zouden

hebben opgemerkt dat zij naar opnamen luisterden als zij naar de muziek hadden geluisterd met het genoegen dat dit luisteren aan geluidsingenieurs geeft wanneer zij niet in functie zijn.

Als dus een elektro-akoestisch systeem voldoet aan de verschillende eisen, die in de vorige hoofdstukken zijn omschreven, dan zal het overgrote deel van de luisteraars niet het verschil horen tussen het gereproduceerde en het echte geluid, wanneer er geen secundaire factoren zijn, die het luisteren beïnvloeden.

Een van deze factoren is de afwezigheid van de uitvoerende musici wat, zelfs als de weergave volmaakt zou zijn, de oorzaak kan zijn van een psychologische onvoldaanheid. Hoewel de proef nooit is genomen zijn we overtuigd, dat als een orkest van het publiek zou worden gescheiden door een dun gordijn, waarvoor enkele niet aangesloten luidsprekers voor het publiek goed zichtbaar zouden zijn opgesteld, enkele kritici zouden schrijven en enkele toehoorders zouden zeggen dat, hoewel het geluid niet slecht was, het toch niet met echte muziek was te vergelijken!

Een andere factor is dat enkele luisteraars, zodra het geluid door luidsprekers wordt voortgebracht, de gewoonte hebben hun aandacht meer te bepalen tot de kwaliteit van het geluid dan tot de kwaliteit van de muziek.

Dergelijke mensen zullen nooit gelukkig zijn. Zij zullen een zeer goede wijn bederven door zichzelf af te vragen of ze de kurk ook proeven.

HOOFDSTUK XI

CLASSIFICATIE

11-1. Wat is Hi-Fi?

In het eerste hoofdstuk werd perfecte weergave gedefinieerd als een weergave waarbij de onvolkomenheden beneden de waarnemingsdrempel liggen. Deze drempels zijn niet voor iedereen gelijk en dus zal een weergave, die de een perfect noemt door een ander niet als zodanig worden gewaardeerd. Slechts als de onvolkomenheden zelfs niet door de meest kritische luisteraars worden opgemerkt mogen we de weergave absoluut perfect noemen.

De meest kritische luisteraar zal zich niet van kleine onvolkomenheden bewust worden als hij niet analyserend naar de klank luistert, maar net als een gewone muziekliefhebber alleen maar de muziek beluistert. We nemen aan dat als de weergavekwaliteit zodanig is, dat tijdens proeven, zoals deze in het vorige hoofdstuk zijn beschreven, 50% van de antwoorden gissingen zijn, het werkelijke genot bij het luisteren naar de muziek 100 % is, of met andere woorden, dat praktisch perfectie is bereikt.

Het zal duidelijk zijn, dat de aard van de muziek, die moet worden weergegeven de minimum eisen bepaalt, die aan de elektro-akoestische installatie moeten worden gesteld. De eisen voor de kwaliteit in het geval van de weergave van de klank van laten we zeggen een viool, zijn anders dan de eisen voor de weergave van een volledig symfonieorkest.

Een elektro-akoestische installatie, die de reproduktie van alle soorten muziek, van solomuziek tot en met luide orkestmuziek, praktisch volmaakt mogelijk maakt, kan men wel de omschrijving „Perfect fidelity" toekennen.

Wij willen voorstellen een installatie, die slechts enkele soorten muziek praktisch volmaakt weergeeft en andere soorten muziek met geringere kwaliteit, een „high fidelity installatie" te noemen.

Dezelfde omschrijving kan dan ook worden gebruikt voor ieder onderdeel van een elektro-akoestische installatie, dat voldoet aan de eisen voor de perfecte opname, versterking of weergave van enkele signalen, zoals zij in de muziek voorkomen.

Volgens deze gedachtengang kan een 2 watt-versterker met beperkte lage tonen weergave nog „high fidelity" worden genoemd, vooropgesteld, dat de niet-lineaire vervorming voldoende klein is en de weergavekarakteristiek voldoende recht is en vlak verloopt. Een dergelijke versterker zal bijvoorbeeld de elektrische signalen, die overeenkomen met de klanken, voortgebracht door een fluit, zonder merkbare vervorming versterken en in combinatie met andere onderdelen van gelijke kwaliteit een perfecte weergave mogelijk maken van de tonen van een fluit. Dit kan een uitbreiding schijnen te zijn van de uitdrukking High Fidelity tot de kleinste en goedkoopste installatie, maar dat is niet zo. De verschillen tussen de 20 W Hi-Fi-versterker en de 2 W-versterker in sommige grammofoons zitten niet alleen in het uitgangsvermogen en het frequentiebereik.

Niet-lineaire vervorming, vlakke karakteristiek, resonanties, brom en ruis zijn andere belangrijke factoren, die te dikwijls in grote versterkers worden verwaarloosd en waarvan meest zonder meer wordt aangenomen, dat zij bij kleine versterkers slecht zijn. Net zo goed als er bij grote versterkers geen enkele reden is dat zij goed zijn omdat zij groot zijn, is er voor een kleine versterker geen enkele reden slecht te zijn omdat hij klein is. De laatste dienen alleen voor andere en beperkter doeleinden.

We mogen niet vergeten, dat een grote versterker ons bij zwakke signalen kan teleurstellen. Een versterker met een groot vermogen is niet automatisch een versterker voor alle doeleinden. Hoewel een fortissimo passage mooi kan klinken kan een solo worden gemaskeerd door bijgeluiden of worden bedorven door vervorming bij lage niveaus van het signaal. Het is echter waar, dat de kleine versterkers, zoals die in sommige radio-ontvangers en platenspelers worden aangetroffen van middelmatige of slechte kwaliteit zijn en hetzelfde kan worden gezegd van heel wat luidsprekers en grammofoonopnemers, die bij dergelijke apparaten worden gebruikt. Het alleen maar ontbreken van voldoende energie om de muren te doen trillen is echter nog geen reden om te zeggen dat de elektro-akoestische installatie geen High Fidelity is.

11-2. Classificatie van Hi-Fi

Als orkestmuziek met orgel en koor moet worden weergegeven moeten de allerzwaarste eisen worden gesteld. Wij denken hier speciaal aan dergelijke werken als de 8e Symfonie van Mahler, „Sinfonie der Tausend",

Crescendo High Fidelity vereist (1):

Tabel 17

Uitgangsvermogen	0,2 W/m³	(2)
Niet-lineaire vervorming	0,3%	
Intermodulatievervorming	1,2%	
Interferentievervorming	0,6%	
Laagste afsnijfrequentie	40 (27) Hz	(3)
Hoogfrequentiegrens (gehele installatie)	16000 Hz	(4)
Hoogfrequentiegrens (versterker)	32000 Hz	
Afval boven de HF grens	6 dB/octaaf	
Resonanties	2 dB	
Weergavegetrouwheid	binnen ± 2 dB	
Fazefouten (stereo)	45°	(5)
Toonhoogtefouten	binnen — 0,25% en + 1,25%	
Jank en flutter	0,6% top tot top	(6)
Brom (gehele installatie)	60 dB beneden max. output	
Brom (versterker)	63 dB beneden max. output	
Dreun (ideaal)	55 dB beneden max. output	
Dreun (praktisch)	38 dB beneden 100 Hz bij 1,4 cm/sec.	
Ruis (gehele installatie)	83 dB beneden max. output	
Ruis (gecompenseerde versterker)	63 dB beneden max. output	
Kanalenscheiding (stereo)	25 dB (meest kritische frequentie) 20 dB (500 — 3000 Hz)	
Nagalmtijd	2,5 seconde	(7)

Noten:

(1) Alle eisen zijn gegeven met de beperkingen, die in vorige paragrafen zijn gesteld, nl. dat een kort durende overbelasting van een van de onderdelen van de elektro-akoestische installatie de goede werking niet gedurende langere tijd in de war stuurt dan de tijd dat de overbelasting optreedt. Waarden, die beter zijn dan de geëiste kunnen voordeel opleveren, maar zijn niet nodig.

(2) Geldt voor luidsprekers met een rendement van 5%. De eisen gelden voor versterkte symfonie orkesten.

(3) De waarden tussen haakjes zijn wenselijk, maar worden niet als noodzakelijk beschouwd.

(4) De weergavekromme moet vlak zijn van de laagste afsnijfrequentie tot aan de hoogste frequentiegrens.

(5) Voor een gedetailleerde specificatie zie blz. 102.

(6) Voor het bepalen van de effectieve waarde delen door 2,8.

(7) Instelbaar tot maximum 2,5 seconde.

verschillende composities van Wagner, de 9e symfonie van Beethoven enz. De crescendi moeten zonder vervorming worden weergegeven, zodat een groot uitgangsvermogen noodzakelijk is, terwijl de aanwezigheid van alle mogelijke muziekinstrumenten in het orkest hoge eisen stelt aan het frequentiegebied. De samengesteldheid van het orkest en het koor

vraagt om een goede stereofonische weergave. De vele plotselinge inzetten kunnen alleen goed worden weergegeven als resonanties zijn voorkomen.

Een installatie, die de fortissimo's van de orkest- en koorcombinaties zodanig weergeeft, dat de onvolkomenheden in de weergave beneden de waarnemingsgrens van de muzikale luisteraar zouden blijven, zouden we High Fidelity-crescendoklasse kunnen noemen. Als zij ook muziek van een beperkter dynamische omvang zou kunnen opnemen of weergeven tot praktische perfectie voor solomuziek, dan zou deze installatie kunnen worden geclassificeerd als Perfect-Fidelity.

Voor Perfect Fidelity is het nodig dat de eigenschappen voldoen aan de eisen voor High Fidelity-crescendo en ook aan de eisen voor de andere High Fidelity klassen, voornamelijk met het oog op brom, bijgeluiden en vervorming op lagere niveaus.

Als het niet nodig is de luidste muziek met absolute getrouwheid te registreren en weer te geven, kan het maximum onvervormde uitgangsvermogen worden verminderd en een aantal andere eisen dienovereenkomstig worden veranderd. Is het de bedoeling gewone symfonische muziek weer te geven, dan spreken we van „Symfonische" High Fidelity.

Tabel 18

Uitgangsvermogen	0,1 W/m^3
Niet-lineaire vervorming	0,3%
Intermodulatievervorming	1,2%
Interferentievervorming	0,6%
Laagste afsnijfrequentie	40 (27) Hz
Hoogfrequentiegrens (gehele installatie)	16000 Hz
Hoogfrequentiegrens (versterker)	32000 Hz
Afval boven HF grens	6 dB/octaaf
Resonanties	2 dB
Weergavegetrouwheid	binnen ± 2 dB
Fazefouten (stereo)	45°
Toonhoogtefouten	— 0,25 tot + 1,25%
Jank en flutter	0,6% top tot top
Brom (gehele installatie)	57 dB beneden max. output
Brom (versterker)	60 dB beneden max. output
Dreun (ideaal)	52 dB beneden max. output
Dreun (praktisch)	38 dB beneden 100 Hz bij 1,4 cm/sec.
Ruis (gehele installatie)	80 dB beneden max. output
Ruis (gecompenseerde versterker)	60 dB beneden max. output
Kanalenscheiding (stereo)	25 dB (meest kritische frequentie) 20 dB (500 — 3000 Hz)
Nagalmtijd	2 seconden.

N.B. Zie noten 1 tot en met 7 van tabel 17.

Bands zijn, per definitie, groepen musici spelende op blaas- en slaginstrumenten, waarbij het voornaamste deel van de klank wordt voortgebracht door de hout- en kopersecties. Met uitzondering van dans- en jazzbands spelen ze gewoonlijk buitenshuis. Een militaire band bestaat uit 25 tot 50 instrumenten, aanmerkelijk minder dan een symfonieorkest, maar dit verschil komt voornamelijk voort uit het ontbreken van de in verhouding „low power" strijkinstrumenten. Uitgedrukt in het akoestische uitgangsvermogen doet de band zeker niet onder voor het symfonieorkest.

Een band kan zeer hoge geluidsniveaus voortbrengen als hij in een zaal speelt, maar zijn normale omgeving is de buitenlucht. Hier zal, op een geschikte afstand beluisterd, het geluidsniveau te vergelijken zijn met dat van een symfonieorkest, dat in een zaal speelt. Hieruit volgt, dat de eisen, die aan het uitgangsvermogen van de versterker worden gesteld, dezelfde zijn als in het voorgaande geval, maar enkele andere eisen verschillen.

Band High Fidelity

Tabel 19

Uitgangsvermogen	0,1 W/m³
Niet-lineaire vervorming	0,3%
Intermodulatievervorming	1,2%
Interferentievervorming	0,8%
Laagste afsnijfrequentie	40 Hz
Toonhoogtefouten	— 1 tot + 2,5%
Jank en flutter	1%
Nagalmtijd	1 seconde

Voor overige gegevens zie tabel 18.

Daar het kamerorkest kleiner is dan het symfonie-orkest speelt het meestal ook in een kleinere zaal en daarom zijn de eisen praktisch gelijk. De belangrijkheid van de strijkinstrumenten in veel werken die voor kamerorkest zijn gecomponeerd, leggen waarschijnlijk de nadruk op het belang van een vlakke en onvervormde weergave van de hoge frequenties, maar dat maakt geen principieel verschil. De weergave van de hoge tonen moet bij symfonische muziek ook goed zijn. Daarom is het niet nodig een speciale klasse in te voeren voor High Fidelity weergave van een kamerorkest.

Daar een dansorkest en een jazzband uit slechts drie tot wel 30 leden

kan bestaan, beïnvloedt dit het akoestische uitgangsvermogen. Het kan al of niet een piano en violen bevatten, maar vrij zeker zal er een slagwerker bij zijn en meestal een contrabassist.

Enkele instrumenten kunnen worden versterkt en veranderd langs elektronische weg en ook een elektronisch muziekinstrument kan er deel van uitmaken. Hieruit volgt, dat het onmogelijk is voor dansorkesten een algemeen geldige klasse voor High Fidelity te omschrijven. Het uitgangsvermogen van de installatie moet vrij groot zijn, aangezien de muziek meestal niet in een stille omgeving wordt weergegeven. Dreun, brom en ruis kunnen om dezelfde reden groter zijn dan is toegestaan voor symfonische muziek. Bij ritmische muziek zullen jank en flutter minder gemakkelijk worden gehoord en de nagalmtijd moet korter zijn.

Voor het serieuze beluisteren van jazzmuziek komen de eisen zeer dicht bij die van tabel 18. In het algemeen echter kunnen de in tabel 20 opgenomen onvolmaaktheden worden toegelaten.

Jazz High Fidelity

Tabel 20

Laagste afsnijfrequentie	50 Hz
Toonhoogtefouten	— 2 tot + 3%
Jank en flutter	0,8% als er een piano bij is 1% zonder piano
Brom (gehele installatie)	50 dB beneden max. uitgangsvermogen
Brom (versterker)	53 dB beneden max. uitgangsvermogen
Dreun	32 dB beneden 100 Hz, 1,4 cm/sec.
Ruis (gehele installatie)	70 dB beneden max. uitgangsvermogen
Ruis (gecompenseerde versterker)	60 dB beneden max. uitgangsvermogen
Nagalmtijd	0,5 — 1 seconde
Voor andere eisen zie tabel 18	

De volgende combinatie muziekinstrumenten, die we moeten beschouwen is het kwartet. Dit kan zijn een strijkkwartet, bestaande uit twee violen, een altviool en een cello; een pianokwartet, bestaande uit een concertvleugel en drie strijkinstrumenten, of er kunnen een houten blaasinstrument en drie strijkinstrumenten zijn. Andere mogelijke combinaties omvatten een fluitkwartet en een kwartet van zangstemmen. Deze kleine ensembles behoeven niet beslist in een concertzaal op te treden. Zij kunnen ook in een grote kamer optreden. Misschien kunnen we die zelfs wel als hun natuurlijkste omgeving beschouwen. Hieruit volgt, dat het benodigde uitgangsvermogen bij ruwe benadering onafhankelijk is

van de afmetingen van de kamer. Het akoestische vermogen varieert van ca. 0,35 W voor het strijkkwartet tot 0,6 W voor het pianokwartet. Een goede gemiddelde waarde is 0,5 W. De eisen zullen minder zwaar zijn voor een fluitkwartet en zwaarder voor een zangkwartet.

Hieruit volgt, dat als een luidspreker met een rendement van 5% wordt gebruikt, de versterker ongeveer 10 W onvervormd vermogen moet leveren. De laagste frequentie, die moet worden weergegeven is 60 Hz voor het strijkkwartet en een kwartet van houten blaasinstrumenten en 40 Hz (27 Hz) voor een pianokwartet.

De eisen voor jank en zweven zijn, dat zij niet boven de toelaatbare grens voor het meest kritische instrument in de combinatie zullen uitkomen. Dat is 0,8% voor het strijkkwartet, 0,7% voor het kwartet van houten blaasinstrumenten en 0,6% voor het pianokwartet. Brom en dreun moeten minstens zo goed zijn als in het geval van de weergave van orkestmuziek, maar dit moet worden beschouwd in verband met de beperkter weergave van de lage tonen in twee van de drie gevallen. Dat wil zeggen, dat als de luidspreker geen frequenties onder de 60 Hz weergeeft, de brom en dreun frequenties beneden de 60 Hz niet tezamen met de hoorbare frequenties moeten worden gemeten. De standaard beproevingsmethoden sluiten, mits goed toegepast, de meting in van signalen waarvan de frequentie lager ligt dan de afsnijfrequentie van de luidspreker. Hieruit volgt, dat als de dreun en de brom zeer lage frequenties bevatten, de uitkomst van de metingen onder de omstandigheden, die wij op het oog hebben, een te pessimistisch beeld geven van de weergave.

Zo zal b.v. als de dreun met al zijn componenten tot 20 Hz naar beneden wordt gemeten, de uitkomst 32 dB kunnen zijn. Worden echter de frequenties onder 60 Hz onderdrukt, dan kan dezelfde draaitafel 40 dB opleveren. We mogen dit niet vergeten als we de waarden uit tabel 21 vergelijken met de gegevens van een installatie.

Wij stellen echter voorop, dat noch de dreun, noch de brom zo groot zijn, dat zij intermodulatievervorming of overbelasting van de versterker veroorzaken.

Tabel 21

		strijkinstr.	piano	houten blaasinstrumenten
Uitgangsvermogen		10	10	10 W
Laagste afsnijfrequentie		60	40	60 Hz
Jank en flutter		0,8	0,6	0,7%
Brom (gehele installatie)	*)	57	57	57 dB onder max. uitgangs-vermogen
Brom (versterker)	*)	60	60	60 dB onder max. uitgangs-vermogen
Dreun (ideaal)		52	52	52 dB onder max. uitgangs-vermogen
Dreun (praktisch)	*)	38	38	38 dB onder 100 Hz bij 1,4 cm/sec.
Kanalenscheiding		20	20	20 dB
Nagalmtijd		1	1	1 seconde

Voor overige gegevens zie tabel 18.

*) Zie hiervoor de voorgaande paragraaf.

De eisen voor de weergave van een trio zijn praktisch gelijk aan die voor een kwartet en daarom is er geen classificatie voor trio High Fidelity nodig.

Het is natuurlijk ook mogelijk de High Fidelity classificatie uit te breiden tot de solo-instrumenten. Opnamen van alleen solo-instrumenten zijn niet erg populair. De meeste solo-opnamen zijn met begeleiding uitgevoerd en dus moet om een dergelijke opname met de gewenste getrouwheid op te nemen of weer te geven, ook rekening worden gehouden met de begeleiding en dit laatste zal zelfs meestal de beslissende factor zijn. Wij proberen echter niet zekere installaties voor te schrijven voor zekere doeleinden, maar wel trachten we enig systeem te brengen in de bestaande verwarring. Een installatie, die b.v. perfect een accordeon weergeeft, kan wel helemaal niet in staat zijn tot perfecte weergave van een symfonie-orkest. De luisteraar naar symfonische muziek zal dan enige beperkingen betreffende het frequentiegebied en de luidheid moeten accepteren en ook tevreden moeten zijn met een iets hoorbare jank en toch is deze installatie in overeenstemming met onze opvattingen van High Fidelity. De getrouwheid is wel niet zo groot als in het geval van symfonie High Fidelity en ook de prijs en de afmetingen zullen dat naar alle waarschijnlijkheid niet

zijn, maar we moeten een lagere grens stellen aan wat wij als High Fidelity aanvaarden voor ons privégebruik en beurs, en deze classificatie is een van de wegen om daartoe te komen.

Het orgel stelt haast dezelfde eisen als een symfonie-orkest. De piano, het veelzijdigste instrument, vergt een elektrisch uitgangsvermogen van ongeveer 12 watt, maar stereofonische weergave is daarbij niet van zoveel belang als voor orkestmuziek, omdat het ruimtelijke effect vergroot kan worden door een weldoordachte luidsprekeropstelling en ook door een nagalmtijd van meer dan 0,75 seconde.

Piano High Fidelity

Tabel 22

Uitgangsvermogen	12 W
Fazefouten (stereo)	—
Kanalenscheiding	0 dB
Nagalmtijd	0,75 seconde
Voor overige eisen zie tabel 18.	
Volgens dezelfde redenering:	

Cello High Fidelity

Tabel 23

Uitgangsvermogen	4 W
Niet-lineaire vervorming	0,5%
Intermodulatievervorming	2%
Interferentievervorming	1%
Laagste afsnijfrequentie	65 Hz
Fazefouten (stereo)	—
Jank en flutter	0,8% top tot top
Brom (gehele installatie)	52 dB beneden max.uitgangsvermogen
Brom (versterker)	55 dB beneden max. uitgangsvermogen
Dreun (praktisch)	35 dB onder 100 Hz bij 1,4 cm/sec.
Ruis (gehele installatie)	75 dB beneden max. uitgangsvermogen
Ruis (gecompenseerde versterker)	65 dB beneden max. uitgangsvermogen
Kanalenscheiding (stereo)	0 dB
Nagalmtijd	0,75 sec.

Voor overige eisen zie tabel 18.

Met Piccolo High Fidelity zullen we de installaties aanduiden, die een getrouwe weergave geven van instrumenten als de piccolo, de waldhoorn, de klarinet en blokfluit. Dit vereist een uitgangsvermogen van ongeveer 2 watt, lage tonen weergave tot op ongeveer 80 Hz (voor de waldhoorn is dat 60 Hz), terwijl de vervorming iets groter mag zijn dan in voorgaande gevallen.

Tabel 24

Uitgangsvermogen	2 W
Niet-lineaire vervorming	0,6%
Intermodulatievervorming	2,5%
Interferentievervorming	1,3%
Laagste afsnijfrequentie	80 (60) Hz
Fazefouten	—
Jank en flutter	0,8% top tot top
Brom (gehele installatie)	50 dB beneden max. uitgangsvermogen
Brom (versterker)	53 dB beneden max. uitgangsvermogen
Dreun (praktisch)	35 dB beneden 100 Hz bij 1,4 cm/sec.
Ruis (gehele installatie)	60 dB beneden max. uitgangsvermogen
Ruis (gecompenseerde versterker)	50 dB beneden max. uitgangsvermogen
Kanalenscheiding (stereo)	0 dB
Nagalmtijd	0,5 seconde

Voor overige gegevens zie tabel 18.

Deze classificatie zou niet compleet zijn zonder verwijzing naar de menselijke stem. Helaas konden wij, hoewel er zeer veel bekend is over de fysica van de spraak en wel voornamelijk door het werk van Fletcher [30] en zijn medewerkers, geen betrouwbare waarden vinden voor het nodige uitgangsvermogen. Een ruwe schatting blijkt ongeveer 3 watt op te leveren, hoewel wij zangers hebben gehoord, waarvan het akoestisch uitgangsvermogen nog lager scheen te zijn dan 150 mW. De nauwkeurigheid en constantheid van de toonhoogte zijn niet gelijk aan die voor mechanische muziekinstrumenten. Dit is misschien geen natuurkundige noodzakelijkheid, maar een zangstem met te grote vastheid wordt als onaantrekkelijk beschouwd.

Het soort stem: bas, bariton, tenor, alt of sopraan, bepaalt de gewenste lage tonen weergave en ook tot op zekere hoogte het vermogen, dat we moeten hebben. In de volgende tabel zijn we ervan uitgegaan, dat de grondtonen van de laagste tonen, die door een bas kunnen worden gezongen, van weinig belang zijn voor de weergavekwaliteit, doordat hun amplitude in verhouding klein is en daarom namen we als laagste weergavegrens 100 Hz aan. We hebben ook aangenomen, dat de hoogste frequentie, die kan worden gemeten, geen muzikale betekenis heeft en hebben daarom de hoogste frequentiegrens op 12 kHz gesteld.

Tabel 25

Uitgangsvermogen	3 W
Niet-lineaire vervorming	0,8%
Intermodulatievervorming	3,2%
Interferentievervorming	1,6%
Laagste afsnijfrequentie	100 Hz
Hoogste frequentiegrens (gehele installatie)	12000 Hz
Hoogste frequentiegrens (versterker)	24000 Hz
Resonanties	3 dB
Weergavegetrouwheid	± 3 dB
Toonhoogtefouten	— 1,5 tot + 2,5%
Jank en flutter	0,9% top tot top
Brom (gehele installatie)	50 dB beneden max. uitgangsvermogen
Brom (versterker)	53 dB beneden max. uitgangsvermogen
Dreun (praktisch)	35 dB beneden 100 Hz bij 1,4 cm/sec.
Ruis (gehele installatie)	60 dB beneden max. uitgangsvermogen
Ruis (gecompenseerde versterker)	50 dB beneden max. uitgangsvermogen
Kanalenscheiding (stereo)	0 dB
Nagalmtijd	0,75 seconde

Deze lijst met High Fidelity Classificaties kan nog aanmerkelijk worden uitgebreid, maar volgens ons idee zijn bovenstaande negen voorbeelden voldoende om de meeste elektro-akoestische installaties en onderdelen te dekken. Het voordeel van deze classificatie is, dat zij is gebaseerd op de karakteristieken van het muzikale geluid en de eigenschappen van het menselijke oor. Wij zijn ons ervan bewust, dat er tekortkomingen aan kleven en dat er momenteel nog niet te voorkomen onnauwkeurigheden inzitten. Wij geloven echter, dat deze minder ernstig zijn dan het feit, dat er nog steeds geen internationale normalisatie van beproevingsmethoden werd overeengekomen en dat de bestaande normalisatie te dikwijls wordt genegeerd. Het is te hopen, dat de enorme hoeveelheid onderzoekingen, die momenteel in veel laboratoria over de gehele wereld worden verricht, het de nationale en internationale organisaties, die zich bezighouden met normalisatieproblemen mogelijk maken op te schieten met hun belangrijke taken.

HOOFDSTUK XII

NASCHRIFT — DE INSTALLATIE

12-1. Van microfoon tot oor

Een logisch vervolg op de voorgaande hoofdstukken zou zijn een bespreking van een installatie met opgave van werkelijke eigenschappen of theoretische grenzen. Met het oog op de omvang van dit boek is dat echter niet mogelijk.

Publicatie van prestatiegegevens zou alleen zin hebben als deze gegevens waren gebaseerd op de meest uiteenlopende apparaten. Gegevens, die afkomstig zijn van een enkele fabrikant zouden veel te beperkt zijn, maar aangezien er slechts weinig eenheid is in de beproevingsmethoden en vooral in de wijze waarop zij worden gepubliceerd, zou een samenvatting van gegevens over verschillende fabrikaten maar weinig zin hebben. Het meten van installaties van verschillende herkomst in één laboratorium zou natuurlijk een oplossing zijn, maar dat zou buitengewoon kostbaar zijn en ook de oorzaak van heel wat discussies tussen de verschillende fabrikanten en de auteur.

Een bespreking van theoretische prestatiegrenzen kan, voor zover dit mogelijk zou zijn, niet in enkele hoofdstukken worden gegeven en zou feitelijk net zoveel boeken nodig maken als er onderdelen in een elektro-akoestisch systeem zitten. Het is b.v. niet makkelijk de theoretische ruisgrens te formuleren van versterkers, die zijn uitgerust met buizen of transistors, terwijl een nieuw type buis of transistor alle voorgaande berekeningen verouderd zou doen zijn. Ook betwijfelen wij of het mogelijk zal zijn het absolute minimum van laten we zeggen janken te berekenen.

In dit hoofdstuk zullen we dus alleen een overzicht geven van de prestaties van moderne installaties.

In tabel 26 worden de verschillende grenswaarden van een elektro-akoestische keten vergeleken met de verschillende eisen. Houden we rekening met de lengte van deze keten en de zeer strenge eisen, die we in voorgaande hoofdstukken hebben afgeleid, dan is een zeker pessimisme betreffende de mogelijkheid muziek met een dergelijke graad van getrouwheid te reproduceren, begrijpelijk. Het feitenmateriaal uit hoofdstuk X toont echter aan, dat dit pessimisme niet nodig is.

Tabel 26 is opgezet voor het afspelen van grammofoonplaten. Er is daarbij van uitgegaan, dat de oorspronkelijke opname werd gemaakt op magnetische band, waarvan een werkcopie werd gemaakt als directe copie van de originele opname. De gang van zaken is in zoverre vereenvoudigd, dat geen speciaal gewag werd gemaakt van het bandopneemapparaat, waarmee de oorspronkelijke opname werd gemaakt en van dat, waarop de gemonteerde band werd afgespeeld voor het maken van de werkcopie.

Ook de bandopnemer, waarop deze copie werd opgenomen en die op zijn beurt diende als afspeelmachine toen de plaat werd gesneden, wordt slechts eenmaal genoemd.

Andere gevallen, die zouden kunnen worden beschouwd zijn het directe afspelen van een originele bandopname, of van een opname, die van een FM radiostation wordt gemaakt, maar om te voorkomen, dat de tabel te uitgebreid wordt zal daarop niet worden ingegaan.

Hoewel nog niet van met de grammofoonplaat vergelijkbaar belang, mag de „gefabriceerde" bandopname toch niet stilzwijgend worden voorbijgegaan. Hiermee bedoelen we de van een handelaar gekochte band, waarop een opname is gemaakt door een fabrikant. Handelscopieën worden voor een snelheid van 19 of 9½ cm per seconde gemaakt van een werkcopie van de originele band, die een eerste, maar evengoed een tweede of derde copie kan zijn.

Vergelijkende luisterproeven tussen de beste in de handel verkrijgbare reeds opgenomen bandjes en grammofoonplaten bewezen de auteur, dat het kwaliteitsverschil, tenminste thans, te klein is om een speciale behandeling van beide systemen te rechtvaardigen. De zwakste punten in een elektro-akoestisch systeem vormen ongetwijfeld de elektromechanische onderdelen, nl. de microfoon, de platensnijder, de plaat, de groeftaster en de luidspreker. De combinatie platensnijder, plaat, groeftaster komt niet voor in bandopname-installaties, maar bij niet professionele bandopnemers is de karakteristiek niet veel beter dan van de zo juist genoemde elektromechanische combinatie. Het vermenigvuldigen van geluidsopnamen op magnetische band brengt ook altijd nog zekere kwaliteitsverliezen mee. Deze techniek is nog niet gestabiliseerd en er zullen zeker nog verbeteringen worden ingevoerd, maar hetzelfde kan ook worden gezegd van de grammofoonplaat. Wanneer we de tegenwoordige 33⅓ toeren grammofoonplaat vergelijken met de huidige magnetische band met een snelheid van 19 cm per seconde, dan kan worden aangenomen, dat een verdere verbetering van beide systemen voor wat de kwaliteit betreft ongeveer gelijk zal opgaan.

Hiermee bedoelen we, dat we geloven, dat als een van de systemen wordt verbeterd er tegelijkertijd ook verbeteringen van gelijke grootte in het andere systeem zullen worden ingevoerd. Deze bewering kan onlogisch klinken, maar een feit is het, dat de totale ontwikkelingstijd van de registratie zowel op band als op plaat thans ongeveer 80 jaar bedraagt. Dat grammofoonplaten reeds jaren voor de bandopname op een economische manier konden worden vervaardigd, verandert niets aan het feit, dat op wetenschappelijk terrein evenveel tijd en aandacht werd besteed aan beide systemen.

Het is natuurlijk waar, dat een directe bandopname, gemaakt met een

Tabel 26

Kritische punten in het elektro-akoestische systeem

Onderdeel	vermogen	vervorming	frequentie-weergave	toonhoogte-veranderingen	jank en flutter	ruis	brom	dreun	overspreken
OPNAME									
Microfoon		X	X			X			
Opneemversterker		X	X			X	X		X
Bandopnemer		X	X	X	X	X	X	X	X
MONTAGE									
Versterker		X	X			X	X		X
Bandopnemer		X	X	X	X	X	X	X	X
COPIEREN									
Versterker	X	X	X			X			X
Snijder/ origineel	X	X	X			X			X
Draaitafel				X	X			X	
Vader/Moeder/ Zoon		X	X		X	X		X	
FABRICEREN									
Matrijs		X	X		X	X		X	
Plaat		X	X		X	X		X	X
AFSPELEN									
Groeftaster		X	X						X
Draaitafel				X	X			X	
Versterker	X	X	X			X	X		X
Luidspreker	X	X	X			X	X		

snelheid van 38 cm/sec. beter van kwaliteit is dan een handelsgrammofoonplaat voor $33^1/_3$ omwentelingen per minuut. Dit is echter eigenlijk geen eerlijke vergelijking. We mogen geen vergelijking maken tussen een origineel in het ene systeem en een copie in het andere. En ook mogen we geen bandsnelheid, die niet economisch is voor algemeen gebruik vergelijken met de economische $33^1/_3$ toeren van een grammofoonplaat.

In de volgende paragraaf mogen we dus, voor zover het de kwaliteit betreft, bandopname lezen in plaats van grammofoonplaat en amateurbandopnemer in plaats van platenspeler.

De enige uitzondering is voor overspreken, waarbij de bandopnemer absoluut in het voordeel is.

In tabel 26 zijn steeds daar kruisjes gezet waar we dachten dat een speciale eis van belang was voor een speciaal onderdeel van de installatie. Enkele van deze punten zijn voor de hand liggend, andere schijnen minder aannemelijk. Zo is b.v. brom niet in verband gebracht met microfoons, omdat de microfoon zelf nooit brom zal opwekken, hoewel hij die wel van andere apparaten kan oppikken. Dat is echter geen fout van de microfoon en het is niet nodig, dat de microfoon ook maar enige brom oppikt. Brom is ook niet bekeken voor versterkers, die met een behoorlijk hoog ingangsniveau werken.

Het vermogen wordt alleen beschouwd voor die installaties, die grote stromen of grote hoeveelheden energie moeten verwerken. Dat zijn zowel de platensnijder en zijn versterker als de eindversterker en de luidspreker. De weergavekarakteristiek is een van de dingen, die door het gehele systeem heen van belang zijn, hoewel we wel moeten bedenken, dat kleine afwijkingen in een onderdeel van het systeem door andere delen weer kunnen worden gecompenseerd, vooropgesteld, dat deze afwijkingen geleidelijk en niet plotseling zijn.

Vervorming is een ander punt, dat dikwijls in de tabel voorkomt. Als de fazefouten zeer klein zijn zullen de vervormingsprodukten in faze zijn en moeten er direct bij worden opgeteld. Dat wil zeggen, dat als een vervorming van bijvoorbeeld 1% toelaatbaar is in een samengestelde installatie, die uit 5 achter elkaar geschakelde eenheden bestaat, er slechts 0,2% kan worden toegelaten voor elke eenheid, tegen 0,45%, die verkregen wordt als een toevallige fazeverhouding wordt aangenomen.

De weg naar volmaaktheid wordt steeds steiler naarmate men dichter bij het doel komt, dat is de speciale aantrekkelijkheid ervan!

12-2. De onderdelen

Microfoons

De moeilijkheid bij het vaststellen van de eigenschappen van een microfoon is, dat metingen belemmerd worden door het feit, dat zij geluidsgolven vereisen met nauwkeurig bekende eigenschappen en vorm. Alleen bij de condensatormicrofoon is het mogelijk proeven te nemen, die zuiver elektrisch zijn. Er wordt dan een rooster voor het diafragma geplaatst en tussen dit rooster en het diafragma kan dan een elektrische spanning worden gelegd. Wanneer eenmaal de eigenschappen van een dergelijke microfoon zijn vastgesteld, dan kan hij worden gebruikt voor het meten van geluidsgolven en daardoor kunnen we dan ook andere microfoons meten.

Van een goede studiomicrofoon zal de vervorming niet boven de 1% komen bij een luidheidsniveau van 110 dB en misschien maar tot 0,1% als de geluidsintensiteit 95 dB ligt boven 10^{-16} W/cm^2. Daarom kunnen we zeggen, dat er microfoons verkrijgbaar zijn met een vervorming, die voldoende laag is voor het Hi-Fi registreren van crescendo's. De vervorming is slechts in geringe mate van de frequentie afhankelijk. De weergavekrommen kunnen recht zijn van 30 tot 16000 of 20000 Hz, tenminste voor geluid, dat de microfoon uit een zekere hoek bereikt. In andere richtingen zal de weergave boven 3000 Hz een weinig beter of slechter worden. Dit laatste geldt ook voor het menselijke oor en kan dus geen bezwaren opleveren. (Dit geldt ook voor stereo-opnamen.) Wij hebben gehoord van laboratoriummicrofoons met een weergavegebied van 1000 tot 70000 Hz, waaruit blijkt dat de grens van 20000 Hz voor de studiomicrofoon niet het uiterste is. Het ruisniveau van een microfoon met inbegrip van dat van de bijbehorende voorversterker kan zo'n 60 dB beneden de output liggen. Dit schijnt wat aan de hoge kant te zijn, maar dat zal natuurlijk alleen moeilijkheden opleveren bij zeer zachte muziek en het zal dikwijls mogelijk zijn tijdens pianissimo gedeelten een microfoon dicht bij de geluidsbron te gebruiken, om dan het in verhouding grote uitgangsvermogen te verzwakken en daarmee de ruis.

Hieruit volgt, dat de tegenwoordige studiomicrofoons min of meer voldoen aan de strengste eisen.

Studioversterkers

De opneem- en afspeelversterker van de bandopnemer zullen we samen behandelen. Als totaal beschouwd, dus van de ingang van de opneem-

versterker tot de uitgang van de afspeelversterker is de opneeminstallatie een actief vierpool-netwerk, waarvan de weergavekarakteristiek recht moet zijn. De magnetisatie van de band hangt echter af van de frequentie, zodat compensatie nodig is en in feite zowel in de opneem- als de afspeelversterkers wordt toegepast. In verband met de gewenste compensatie zal de dynamiek van de versterkers, dat is de verhouding tussen het zwakste en het sterkste signaal, dat moet worden verwerkt, groter worden door de totale hoeveelheid voor- en na-compensatie. Het is mogelijk opneem- en afspeelversterkers met volledige compensatie te bouwen, waarvan het ruisniveau 80 dB ligt beneden het maximum uitgangsvermogen en waarvan de niet-lineaire vervorming niet boven de 0,1% uitkomt, terwijl de intermodulatievervorming nog onder de 0,3% blijft. De weergavekarakteristiek kan, wanneer rekening wordt gehouden met de compensatie, binnen 0,5 dB recht zijn van 20 tot 200000 Hz. De brom kan meer dan 40 dB beneden het maximum uitgangsvermogen (grondfrequentie en tweede harmonische) liggen en meer dan 55 dB beneden het maximum uitgangsvermogen voor de hogere harmonischen.

Bandopnemers

Er zitten zo'n 2×10^{11} ijzeroxydedeeltjes op iedere vierkante centimeter van een magneetband. Bij een bandsnelheid van 38 cm per seconde zullen zo ongeveer 10^{11} deeltjes per seconde langs een spleet in de afspeelkop passeren. Dit zal ruis veroorzaken, die geschat wordt op ongeveer 80 dB beneden het verzadigingsniveau van de band of ongeveer 70 dB beneden het maximum registratieniveau. Als de deeltjes niet regelmatig verdeeld zijn, zal dat fluctuaties veroorzaken in de gevoeligheid van de magnetische deklaag, die modulatieruis ten gevolge zullen hebben. Een fluctuatie van slechts 1% in het aantal deeltjes, dat per tijdseenheid de opneemkop passeert zal modulatieruis tot 40 dB beneden het signaal veroorzaken. Deze modulatieruis zal onhoorbaar zijn omdat hij door het signaal wordt gemaskeerd. Als de band echter een gelijkstroommagnetisatie heeft ondergaan (gemagnetiseerde bandkop bijvoorbeeld) of als de HF voormagnetisatiestroom vervormd is, dan zal de gelijkstroommagnetisatie of de vervorming aanleiding zijn tot modulatieruis, die niet door het gewenste origineel wordt gemaskeerd. Bij juiste bedrijfsomstandigheden zal het werkelijke ruisniveau zeer dicht liggen bij de grenswaarde, die wordt bepaald door de aanwezigheid van de vele ijzeroxydedeeltjes.

Bij een niveau, dat 10 dB beneden de verzadiging ligt is de werkelijke vervorming ongeveer 2%.

Wanneer hoorbare vervorming moet worden voorkomen, dan moet het maximum registratieniveau met ongeveer 5 tot 10 dB worden verlaagd. Als deze vervorming is voorkomen dan kan er nog een zwak hoorbare ruis optreden gedurende rustpauzen in de muziek en gedurende pianissimo gespeelde gedeelten.

Het frequentiegebied dat kan worden opgenomen en weergegeven hangt af van de spleetbreedte en de bandsnelheid. Vooropgesteld, dat de band goed tegen de kop aanligt, kan de studiobandopnemer signalen vastleggen van 20 Hz tot 20000 Hz zonder dat merkbare onregelmatigheden optreden. Bij niet professionele installaties zal het gebied wat kleiner zijn.

De resultaten kunnen worden beïnvloed door resonanties in de opneem- en afspeelkop. De eerstgenoemde heeft meestal zo'n lage impedantie, dat de resonantiefrequentie behoorlijk hoger ligt dan 20000 Hz, maar de afspeelkop zal voor het vereiste rendement een hogere impedantie hebben. Nauwkeurig bewikkelen en een goed doordachte schakeling en bedrading kunnen echter voorkomen, dat de resonantie in het hoorbare gebied valt. Bij onze proeven, die in hoofdstuk X zijn beschreven, geloofden wij echter, dat voor de „vliegenklappers" de resultaten beter zouden zijn geweest als de resonantiefrequentie van de afspeelkop iets hoger had gelegen.

De nauwkeurigheid van de toonhoogte wordt beïnvloed door de frequentie-afwijkingen van de netspanning. De meeste elektrische centrales hebben tegenwoordig een hoge graad van stabiliteit. Slip van de magnetische band ten opzichte van de aandrijvende as zal ook toonhoogteverschillen veroorzaken, maar dit verschijnsel kan worden beperkt tot 0,2% of zelfs minder. De middellijn van de aandrijfas kan tot een dergelijke nauwkeurigheid worden vervaardigd, dat de bandsnelheid buitengewoon dicht bij de nominale waarde ligt. Als dan ook nog de opname en het afspelen met dezelfde machine gebeurt heeft de doorsnede van de aandrijfas geen invloed op de toonhoogte van de weergegeven toon. Bij een op de juiste wijze onderhouden professionele installatie kan de jank beneden de 0,3% worden gehouden. Brom en dreun kunnen moeilijkheden opleveren, maar zij kunnen worden voorkomen, hoewel het niet gemakkelijk is brom volkomen te onderdrukken.

De grammofoonplaat

In verband met de vorm van de snijnaald mag de zijwaartse naaldsnelheid

nooit de groefsnelheid te boven gaan. Dit beperkt de registratie van sterke signalen met hoge frequentie, vooral in de binnenste groeven. Verder mag de amplitude van de registratie nooit zo groot worden, dat twee naast elkaar liggende groefspiralen in elkaar lopen. Het gevolg hiervan is, dat de amplitude van de signalen met lage frequenties beperkt moet worden. Bij een oordeelkundige keuze van de opneemkarakteristiek is het niettemin mogelijk de lage frequenties goed te registreren, maar dan is de registratie van de hoge frequenties beperkt naar het eind van de opname toe.

Er zijn proefplaten gemaakt met een signaal van 19000 Hz, opgenomen met een zijwaartse snelheid van 5 cm/sec., waarvan de registratie dicht bij de rand van een 30 cm plaat was gelegen. Het is interessant te constateren, dat de naald onderhevig is aan versnellingen tot meer dan 5 km/sec.^{2} en dat deze enorme versnellingen blijkbaar de naald niet meer kwaad doen dan de aanmerkelijk geringere versnellingen aan de ruimtevaarder. Nog hogere snelheden kunnen niet worden verwezenlijkt, maar deze zullen waarschijnlijk niet optreden bij frequenties, die flink boven de 10000 Hz liggen. Dicht bij de uitloopgroef is de opneemsnelheid voor frequenties van 19000 Hz beperkt tot 2 cm/sec. Dit is een geringe beperking van de weergavekwaliteit.

De opneemcompensatie die nodig is houdt in, dat de dynamiek van de registratie op de plaat groter is dan die van de weergave. De nacompensatie in het weergeefapparaat brengt een toeneming van de dreun, maar een verzwakking van bijgeluiden met hoge frequenties met zich mee. Daar de amplitude van de ruissignalen onafhankelijk is van de frequentie en de amplitude van de hoogfrequentie componenten klein is, zal de signaal-ruisverhouding het kleinst zijn voor de hoge frequenties. Ook dit is een geringe kwaliteitsbeperking.

De bijgeluiden van de plaat worden bepaald door de kwaliteit van het materiaal en door de kwaliteit van de matrijzen. Moderne platenmaterialen zijn zeer homogeen (in tegenstelling tot de oxydelaag op band, die van nature niet homogeen is) en de matrijzen kunnen van buitengewoon goede kwaliteit zijn, redenen waarom de signaal-ruisverhouding van een goede grammofoonplaat zeer dicht die van een goede magnetische opneemband kan benaderen. Dit wordt aangetoond door het feit, dat een geringe hoeveelheid modulatiebijgeluiden door de bijgeluiden van de plaat heen kunnen worden gehoord.

Het dreunniveau van een grammofoonplaat kan 50 dB liggen beneden het niveau van de 100 Hz proef-referentietoon, die wordt opgenomen

met een snelheid van 1,4 cm/sec., hoewel handelsplaten meestal een dreunniveau hebben van — 45 tot — 40 dB.

De weergavekwaliteit hangt niet alleen van de plaat af, maar ook van de groeftaster. De afspeelvervorming kan worden berekend, maar deze berekeningen zijn van beperkt praktisch belang omdat de weerstand, die de plaat op de naald uitoefent de neiging heeft de afspeelfouten te verkleinen. Vooropgesteld dat de toonarm goed is ontworpen is de afspeelvervorming van weinig belang.

Ook de aftastvervorming kan worden berekend, maar deze is ook weer van weinig praktische waarde, omdat de klassieke berekeningen gebaseerd zijn op platenmateriaal van oneindige hardheid.

De plasticiteit en elasticiteit van vinyl beïnvloeden beide de weergavekarakteristiek en de vervorming. Wanneer we de elasticiteit van het materiaal verwaarlozen, vinden we dat lineaire- en niet-lineaire vervorming afnemen als de punt van de naald dunner wordt gemaakt en de snelheid van de draaitafel toeneemt. Dit zal alleen opgaan voor normale materialen, wanneer met de verkleining van de straal van de naaldpunt ook de vertikale naaldkracht wordt verkleind. Deze naaldkracht is nu zo ongeveer 4 gram bij de betere installaties, wat tussen twee haakjes hetzelfde is als we bij onze oude Edison cilinder fonograaf uit 1907 hebben gemeten! Een verdere vermindering van deze toch al lage waarde is niet uitgesloten, maar met een goede groeftaster is een weergave tot 12000 à 20000 Hz reeds mogelijk. Hoewel het mogelijk is de lineaire vervorming (weergavekromme) te berekenen en daarbij rekening te houden met de mechanische eigenschappen van de plaat, is dat tot nu toe nog niet gedaan voor niet-lineaire vervorming. Jammer genoeg zijn deze vervorming en speciaal de intermodulatievervorming nog steeds niet op een betrouwbare wijze te meten. Resonantieverschijnselen, die optreden tussen het oppervlak van de plaat en de naald en in de groeftaster maken de uitkomsten van dergelijke proeven voor een groot deel afhankelijk van de frequentie en een lager intermodulatiewaarde, gemeten bij bijvoorbeeld 400 en 8000 Hz wil niet zeggen, dat de weergave even goed zal zijn als de proeffrequenties 420 en 8000 Hz bedragen. Bovendien kan de vervorming vrij ongeregeld toenemen of afnemen als het registratieniveau wordt veranderd.

Groeftaster en plaat kunnen niet onafhankelijk van elkaar worden gemeten, behalve bij de opneemkarakteristiek, die kan worden gemeten volgens de methode van Mayer-Buchman. Bij luisterproeven kregen we de indruk, dat de vervorming van de combinatie groeftaster en plaat nog

1% kan zijn, gerekend over de gehele combinatie, waarbij het mogelijk is, dat bij sommige frequenties de vervorming groter is en bij andere frequenties minder. Dit in tegenstelling tot versterkers waarbij — als ze goed zijn ontworpen — de vervorming min of meer onafhankelijk is van de frequentie. Zolang het nog mogelijk is onderscheid te horen tussen twee versterkers met vervormingswaarden van respectievelijk 1 en 2%, kan de groeftaster-plaat-vervorming niet veel hoger zijn dan 1%.

Het overspreken van platen en groeftasters is ook niet te berekenen, maar metingen tonen aan dat een kanalenscheiding van 20 dB of beter kan worden bereikt voor dat deel van de frequentiekarakteristiek, dat van belang is.

Jank en flutter kunnen zowel bij het opnemen als het afspelen optreden. In beide gevallen veroorzaakt jank eerder moeilijkheden dan flutter. De jank van de opneemdraaitafel zal als regel minder zijn dan die van de afspeelmachine, zodat we alleen met deze laatste moeten rekening houden. Hiervoor is een goede gemiddelde waarde voor de betere tegenwoordige installaties voor gebruik thuis, ongeveer 0,8% top tot top. Enkele van de allerbeste, niet altijd de duurste installaties komen beneden de 0,6%.

De nauwkeurigheid van de toonhoogte van gewone amateur draaitafels, met inbegrip van platenwisselaars, is meestal beter dan 2%, terwijl sommige installaties een nauwkeurige instelling van de snelheid mogelijk maken met behulp van een soort reminstallatie. Het verlopen van de toonhoogte, veroorzaakt door het afremmen van de naald als de groeftaster over de plaat beweegt, kan tot 0,5% bedragen.

De werkelijke waarde, waarbij dreun hinderlijk wordt hangt voor een groot deel af van de weergavekarakteristiek voor de lage frequenties van de groeftaster, de versterker en de luidspreker. Toonarmresonanties, die als zodanig niet zijn te voorkomen, kunnen de resultaten tot op grote hoogte beïnvloeden. Het is echter mogelijk de toonarmresonanties te verlagen tot beneden 25 Hz en ook kan er nog extra demping worden toegepast. Een waarde voor dreun beter dan — 35 tot — 38 dB beneden de 100 Hz referentietoon is moeilijk te bereiken. Zoals reeds werd opgemerkt is het dreunniveau van de platen niet veel beter dan — 40 dB. Daarom moeten, om tot een situatie te komen waarbij dreun werkelijk onhoorbaar is, zowel de platen als de draaitafels worden verbeterd. Wij wijzen de amateur erop, dat als hij twee verschillende draaitafels vergelijkt, hij zich er eerst van moet overtuigen, dat deze dezelfde lage tonen weergave hebben alvorens de dreun te beoordelen omdat bij sommige apparaten de

frequenties onder de 100 Hz worden verzwakt om de dreun te onderdrukken. Het ontbreken van echte bassen kan worden gecamoufleerd door een resonantietop bij ongeveer 120 Hz, vandaar, dat conclusies zeer voorzichtig moeten worden getrokken.

Het probleem bij versterkers is niet, hoe een goede te maken, maar veel meer hoe er een te maken die goed is en tevens niet duur. Het ontwerpen van schakelingen is zover gevorderd, dat versterkers kunnen worden gebouwd, die voldoen aan meer dan de eisen, die eerder in dit boek zijn opgenomen, met inbegrip zelfs van een goede stabiliteit bij overbelasting. Hier is, als altijd, de prijs niet het enige criterium. Een zeer duur ontwerp kan nog steeds niet in alle opzichten voldoen, een in verhouding goedkope versterker kan verrassend goed zijn.

Luidsprekers, die frequenties weergeven van 45 tot 18000 Hz kunnen met een vlakke weergavekarakteristiek worden vervaardigd. Geluidstechnici, die dit gebied nog willen uitbreiden, kunnen dit doen door het combineren van lage tonen, middentonen en hoge tonen luidsprekers en op die manier geluiden weergeven met frequenties van 20 Hz tot nog boven de 40000 Hz.

Vervorming is een onderwerp, waarover in de literatuur weinig wordt gezegd omdat het buitengewoon moeilijk is deze op een praktische manier te meten. Metingen aan enkele luidsprekertypen bij 400 Hz tonen aan, dat op z'n minst tonen van deze frequentie kunnen worden weergegeven op het vereiste niveau zonder meer vervorming dan wordt toegelaten. Naar alle waarschijnlijkheid geven deze luidsprekers ook andere frequenties met zeer weinig vervorming weer, behalve misschien bij enkele bepaalde frequenties, waarbij de conus opbreekt en bij de grond-resonantiefrequentie. Deze laatste vervorming kan worden voorkomen door de resonantie te dempen, hetzij door maatregelen in de luidspreker, hetzij door een goed ontworpen kast of beide.

Het cirkelvormige polaire diagram, dat voordelen geeft bij stereofonische weergave kan inderdaad met enige benadering worden verkregen.

Het grootste probleem in verband met de luidspreker is de kast. De luidspreker zelf kan van uitstekende kwaliteit zijn, maar als hij wordt geplaatst in een kast, die te klein is of niet goed ontworpen of gebouwd, dan zullen de resultaten teleurstellen. Dit is echter geen beperking, hoewel het jammer is, dat de omstandigheden het dikwijls onmogelijk maken de juiste kast te gebruiken. Het is ook jammer, dat maar al te dikwijls een luidspreker wordt beoordeeld op zulke onbelangrijke factoren als de

afmetingen en het gewicht. De regel, dat kwantiteit en kwaliteit niet mogen worden verward, geldt ook voor luidsprekers.

AANHANGSEL

Harmonische en niet-harmonische vervorming

a) *Vervorming door de tweede harmonische*

Als de amplitude (spanning, stroom, snelheid of druk) karakteristiek van een onderdeel of versterker gelijk is aan

$$Y = x + \alpha x^2 \tag{1}$$

waarin Y de output en x het ingangssignaal en we stellen

$$x = A_l \sin \omega_l t + A_h \sin \omega_h t \tag{2}$$

waarin A_h de amplitude van het signaal met de hoogste frequentie en A_l de amplitude van het signaal met de laagste frequentie, dan is

$$\begin{aligned} Y = {} & A_l \sin \omega_l t + A_h \sin \omega_h t \\ & + \alpha A_l^2 \sin^2 \omega_l t + \alpha A_h^2 \sin^2 \omega_h t \\ & + 2 \alpha A_l A_h \sin \omega_l t \quad \sin \omega_h t. \end{aligned} \tag{3}$$

De vervorming door de 2e harmonische is:

$$d_2 = \frac{\alpha (A_l + A_h)}{2} \tag{4}$$

De niet-harmonische vervorming is:

$$NH_2 = 2\alpha A_l \tag{5}$$

De verhouding tussen harmonische en niet-harmonische vervorming is:

$$\frac{NH_2}{d_2} = \frac{4A_l}{A_l + A_h} \tag{6}$$

In het geval dat $A_l = 4A_h$, zoals gebruikelijk is voor de meting van intermodulatievervorming (IM), *is:*

$$\frac{IM_2}{d_2} = 3{,}2 \tag{7}$$

Als A_l en A_h een gelijke amplitude hebben, zoals het geval is als interferentievervorming(BN) wordt gemeten, dan is:

$$\frac{BN_2}{d_2} = 2 \tag{8}$$

b) *Vervorming door de derde harmonische*

De grondvorm van de amplitudekarakteristiek is:

$$Y = x + \beta x^3 \tag{9}$$

Substitutie van (2) in (9) levert na vereenvoudiging op:

$$\begin{aligned} Y = {} & A_l \sin \omega_l t \left(1 + \frac{3}{4}\beta A_l^2 + \frac{3}{2}\beta A_h^2\right) \\ & + A_h \sin \omega_h t \left(1 + \frac{3}{4}\beta A_h^2 + \frac{3}{2}\beta A_l^2\right) \\ & - \frac{3}{2}\beta A_h^2 A_l \sin \omega t \cos 2\,\omega_h t \\ & - \frac{3}{2}\beta A_l^2 A_h \sin \omega_h t \cos 2\,\omega_l t \\ & - \frac{1}{4}\beta A_h^3 \sin 3\omega_h t - \frac{1}{4}\beta A_l^3 \sin 3\,\omega_l t \end{aligned} \tag{10}$$

De vervorming door de derde harmonische is:

$$d_3 = \frac{A^2\beta}{4 + 3\beta A^2}$$

waarin $A = A_l + A_h$ (11)

De niet-harmonische vervorming is:

$$NH_3 = \frac{6\beta A_l^2}{4 + 3\beta A_h^2 + 6\beta A_l^2} \tag{12}$$

De verhouding van de harmonische vervorming tot de niet-harmonische vervorming is vooropgesteld dat β klein is, zoals dat het geval zal zijn bij een High Fidelity installatie, gelijk aan:

$$\frac{NH_3}{d_3} \approx \frac{6A_l^2}{(A_l + A_h)^2} \tag{13}$$

In het geval dat $A_l = 4A_h$ vinden we dat:

$$\frac{IM_3}{d_3} = 3{,}8 \tag{14}$$

Als $A_l = A_h$ dan is:

$$\frac{BN_3}{d_3} = 1{,}5 \tag{15}$$

De formules (13), (14) en (15) gaan alleen op als $d_3 \leqq 0{,}05$ (5%).

c) *Vervorming door de tweede en derde harmonische tezamen*

Uit (7) en (14) leiden we af, dat de totale intermodulatievervorming gelijk is aan:

$$IM_{2,\,3} = 3{,}2\ d_2 + 3{,}8\ d_3 \qquad \text{of}$$
$$IM \approx 3{,}6\ d \qquad (16)$$

Uit (8) en (15) vinden we dat de totale interferentievervorming gelijk is aan:

$$BN_{2,\,3} = 2\ d_2 + 1{,}5\ d_3 \qquad \text{of}$$
$$BN \approx 1{,}75\ d \qquad (17)$$

De formules (16) en (17) zijn ook ongeveer juist als de vervorming nog hogere harmonischen bevat, vooropgesteld dat de amplitude daarvan klein is.

Deze formules verliezen hun betekenis als de verhouding $A_l : A_h$ aan de uitgang tengevolge van afwijkingen in de weergavekromme aanmerkelijk verschilt van die aan de ingang.

LITERATUURLIJST

[1]	Vermeulen, R.	*Perspectieven voor een ontwikkeling van de viool,* Philips Technisch Tijdschrift, Jg. **5** no. 2, 1940
[2]	Moles, A.	Op het congres „Musique à la Radio", Parijs 1954
[3]	Krieger, F.	*Messung der elektroakustischen Übertragungsgüte von Mikrophonen mit Hilfe der Korrelation,* Nachrichten technische Fachberichte, **15**, 1959
[4]	Schaeffer, P.	Journal de la Musique Concrète, Revue Polyphonic numéro consacré à la musique mécanisée, Editions Richard Masse
[5]	Somerville en Brownless	*Listeners' sound level preferences,* B.B.C. Quart, januari 1949
[6]	Fletcher	*Loudness, its definition, measurement and calculation,* J. Acoust. Soc. Amer **5**, 1933
[7]	Stevens	J. Acoust. Soc. Amer **6**, 1934
[8]	Wood	Aangehaald in: Briggs, Loudspeakers, 5th edition, blz. 112, Bradford, 1958
[9]	McKnight	*The distribution of peak energy in recorded music,* Journal A.E.S., **7**, 1959
[10]	Somerville en Gilford, C. L. S.	*Acoustics of large orchestral studios and concert halls,* Proc. I.E.E. (Great Britain), maart 1957
[11]	Sivian, Dunn en White	J. Acoust. Soc. Amer. J.A.S.A. **2**, 3, 1959
[12]	Wegel en Lane	Aangehaald in H. Olson, Musical Engineering, New York, blz. 256, 1952
[13]	Moe	J. Acoust. Soc. Amer, **13**, 1942 J. F. Schouten, Proc. Kon. Ac. v. Wetensch. **12**, 1938
[14]	Wegel en Lane	Aangehaald door J. Matras, L'onde électrique, No. **350**, 1956
[15]	Olson, H.	*Elements of Acoustical Engineering,* New York, 1947
[16]	Schouten, J. F.	Proc. Kon. Ac. v. Wetensch., **41**, 1086, 1938, **43**, 991, 1940 Zie ook E. de Boer, *On the residue in hearing,* pp. 26-33, Dissertatie, Amsterdam, 1956
[17]	Harris, G. G.	Journal A.E.S., **9**, 1, 1961
[18]	Franssen N.V.	*Some Considerations on the mechanism of directional hearing,* Proefschrift, Delft, 1960
[19]	Fletcher	*Speech and hearing,* New York, 1929
[20]	Schurink, J. J.	*Transient response distortion of loudspeakers,* Hi-Fi Monitor Jg. **1**, 93, 1959
[21]	Huggins	Aangehaald door E. de Boer [16]
[22]	Pol, Balth. v. d. en Addink, C. C. J.	*De stemming van muziekinstrumenten en orkesten,* Philips Technisch Tijdschrift, Jg. **4**, 217, 1939
[23]	Boer, J. de	*Absolute geluidsdrukmetingen,* Philips Technisch Tijdschrift, Jg. **2**, 82, 1937

[24] Young — Acoustique Musicale op het Congress Marseille 1958, Parijs, 1959

[25] Shower en Biddulph — J. Acoust. Soc. Amer., **2** Part 1, 1931

[26] Husson — Annales des Télécommunications, **8**, 1953

[27] Stott en Axon — Journal I.E.E. (B), 1955

[28] Boer, G. J. de — *Turntable friction,* R. G. T. Monitor, Jg. **2**, 53, 1961

[29] Hoth — J. Acoust. Soc. Amer. **12**, 1941

[30] Fletcher — Speech and Hearing in Communication, New York, 1953

[31] Boer, K. de — *Stereophonic Sound Reproduction,* High Fidelity Monitor, Jg. **1**, 30, 1959

[32] McCoy, D. S. — *Distortion of Auditory Perspective Produced by Interchannel Mixing at High and Low Audio Frequencies* Journal A.E.S., **9**, 1, 1961

[33] Naar Culver — Musical Acoustics, New York, 1956

[34] Naar Bachhaus — Aangehaald in Skudryk, Die Grundlagen der Akustik, Wenen, 1954

[35] Wood — The Physics of Music, 1949

[36] Vermeulen, R. — *Perspectieven voor een ontwikkeling van de viool,* Philips Technisch Tijdschrift, Jg. **5**, no. 2, 1940

[37] Harvey en Schroeder — Journal A.E.S., **9**, 1, 1961

[38] Franssen, N.V. — *Some investigations on directional hearing,* R.G.T. Monitor, Jg. **2**, 8, 1960

[39] Somerville — *An Empirical Acoustic Criterion,* Acustica **3**, 1953 Zie ook Proc. I.E.E., 1957

[40] Meyer — *Neuere Messverfahren zur Raumakustik und ihre Bedeutung für die akustische Beurteilung von Räumen,* De Ingenieur, 1958

[41] Haas, H. — Acustica, **1**, 49, 1951

[42] Enkel, F. — In Klangsstruktur der Musik, Berlin, 1955

[43] Vermeulen, R. — *Stereonagalm,* Philips Technisch Tijdschrift, Jg. **17**, 223, 1955

GELUIDSKWALITEIT

waaraan een geluidsinstallatie moet voldoen;
over klanken van muziekinstrumenten
en eigenschappen van het oor

Een onderzoek naar de eisen voor perfecte weergave
of absolute getrouwheid (fidelity)
van een elektro-akoestische installatie.
Vergelijking van algemene eisen en specifieke eisen,
ten aanzien van de weergave
van verschillende muziekinstrumenten en ensembles.
Hieruit wordt een op de muziek gebaseerde indeling
in kwaliteitsklassen afgeleid.
In het laatste hoofdstuk zijn de diverse onderdelen van een
geluidsinstallatie in het kort aan de vastgestelde eisen getoetst.
Een geslaagde poging tot definitie en classificatie van Hi-Fi.